

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
Departamento de Ingeniería Rural

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS AGRÓNOMOS
BIBLIOTECA
FECHA ENTRADA 3-11-96
N.º DOCUMENTO 273452
N.º EJEMPLAR 273458a
SIGNATURA T 629
• R 546 "T 2"

Secadero Experimental para el Curado de Tabaco Virginia
en el Valle del Tiétar:
Determinación de Parámetros para el Ahorro Energético del Proceso

Autor: Eyandro de Castro Melc

Director de la Tesis: Saturnino de la Plaza Pérez

Madrid, septiembre de 1995

Don SATURNINO DE LA PLAZA PÉREZ, Catedrático del Departamento de Ingeniería Rural de la E. T. S. de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid,

CERTIFICA:

Que el presente trabajo *Secadero Experimental para el Curado de Tabaco Virginia en el Valle del Tietar: Determinación de Parámetros para el Ahorro Energético del Proceso* que presenta el Ingeniero Agrónomo Evandro de Castro Melo para optar al Grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid, ha sido realizado bajo su dirección y autoriza con esta fecha su presentación.

Y para que conste, firma el presente certificado en Madrid, a diecinueve de Julio de mil novecientos noventa y cinco.



Fdo.: Saturnino de la Plaza Pérez.

A la memoria de mi *Madre*,

A mi *Padre*,

A mis *hermanos*,

A todos mis queridos *sobrinos*,

Al *amor* y a la *amistad*.

AGRADECIMIENTOS

Es obligado recoger aquí el agradecimiento del autor a personas e instituciones sin cuya contribución no hubiera sido posible la realización de esta Tesis.

Al Gobierno Brasileño, específicamente a CAPES (*Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal Docente de Ensino Superior*) y a la *Universidade Federal de Viçosa* que me concedieron la beca y la oportunidad de realizar el Doctorado en España.

A D. Saturnino de la Plaza, a quien debo manifestar mi más profundo agradecimiento no sólo por su eficaz labor de dirección sino por el estímulo que en todo momento me ha prestado para la realización de esta Tesis.

A D. Heliodoro Pérez Carbonell, Director de Producción de CETARSA, por poner a disposición del Departamento de Ingeniería Rural de la UPM toda la infraestructura y personal de su Departamento de I+D, la Finca la Cañalera.

A D. Inocencio Blanco, jefe del Departamento de I+D de CETARSA, y también a los técnicos y funcionarios de la Cañalera, por aportar su experiencia práctica y por su colaboración en los ensayos de campo.

A D. Félix, cultivador de tabaco de la Finca Cuaternos, por la amistad, paciencia y la gran ayuda prestada a lo largo de las dos campañas de tabaco.

A D. Gregorio Bermejo, Director Gerente de INDUSTRIAS AGROTEX, por la valiosa asistencia técnica dada al secadero experimental.

A D. José Luis García Fernández, por la amistad y por su gran dedicación y por las valiosas sugerencias en la última fase de esta Tesis.

A los compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Rural: Luis Manuel Navas, Luis Luna, José Escribano, Eduardo Hernández Díaz, María Rosario Izquierdo, Josefa García Otero, Eva García, Pilar Barreiro y Rosa María Benavente por su amistad y apoyo.

A Edmaura Melo Martins y a José Carlos Martins, que desde Brasil, siempre estuvieron presentes en mis momentos más difíciles, apoyandome con toda su alma.

A mis amigos brasileños, colegas del Doctorado, Angela Cavalcanti Mourão Crespo y familia, Cláudia Pereira Lima, Heraldo Peixoto da Silva, José da Cunha y familia, José César Teatini y familia, Luiz Eduardo, Paulo César Corrêa y familia, Roberto Proença Passarinho, Venerando y familia, Vicente Militão Neto, por la amistad y el cariño que siempre me dedicaron.

Al resto de los profesores y personal del Departamento, que siempre han estado dispuestos a proporcionar sugerencias útiles o a prestar su colaboración en esta Tesis, por su amistad y apoyo.

INDICE GENERAL

	PÁGINA
INDICE DE FIGURAS.....	iv
INDICE DE TABLAS.....	vi
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1.INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Importancia Económica del Tabaco	5
1.2 El Mercado de Tabaco en el Mundo	7
1.3 El Tabaco en España	11
2.OBJETIVOS.....	17
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 El Tabaco <i>Flue-Cured</i>	18
3.2 El Curado del Tabaco Virginia	20
3.3 Análisis Energético del Proceso de Curado	25
3.4 Simulación del Proceso de Curado	32
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	35
4.1 Descripción del Secadero Experimental	35
4.2 Local de los Ensayos	38
4.3 Ensayos Preliminares	39
4.4 Ensayos de la Campaña de 1994	43

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
5.1 Resultados de la Campaña de 1993	49
5.2 Resultados de la Campaña de 1994	52
5.2.1 Curva de Secado	53
5.2.2 Programa de Curado	57
5.2.3 Caudal de Aire de Curado	60
5.2.4 Consumo de Energía	63
5.2.5 Análisis Químicos	66
5.3 Modelo para el <i>Día Típico</i> durante la Campaña del Tabaco de 1994	68
5.4 Modelo para Calcular Tbs y Hr del Aire de Curado	70
5.5 Modelo para el Cálculo del Consumo de Combustible	74
6. CONCLUSIONES.....	77
7. BIBLIOGRAFIA.....	79
ANEXOS.....	87

INDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1 - Consumo de cigarrillos en España - porcentaje año de rubio y negro	15
Figura 1.2 - Producción de tabaco en España, año 1994	16
Figura 3.1 - El aire en el interior de un secadero de tabaco Virginia	24
Figura 4.1 - Secadero experimental sin las bandejas	36
Figura 4.2 - Secadero experimental con una de las bandejas	36
Figura 4.3 - Esquema del secadero experimental de dos bandejas	36
Figura 4.4 - Detalle del sistema de control automático del programa de curado que actúa sobre Tbs y Tbh del aire de curado	37
Figura 4.5 - Esquema de la metodología aplicada en la campaña del tabaco de 1994	48
Figura 5.1 - Curvas de secado de tabaco, campaña del tabaco de 1994	54
Figura 5.2 - Programa de curado, campaña del tabaco de 1994	58
Figura 5.3 - Programa de curado del secadero de 4 bandejas, donde cada punto se refiere al promedio de 4 ensayos en la campaña del tabaco de 1994	59
Figura 5.4 - Caudal de aire de curado, campaña del tabaco de 1994	61
Figura 5.5 - Consumo de combustible (gas propano) , campaña del tabaco de 1994	64
Figura 5.6 - Modelos para estimación de la temperatura y humedad relativa del aire ambiente del <i>Día Típico</i> durante los ensayos realizados en la campaña del tabaco de 1994 en el valle del Tiétar	69

Figura 5.7 - Temperatura del aire de curado saliendo de la masa de tabaco	71
Figura 5.8 - Humedad relativa del aire de curado saliendo de la masa de tabaco	73
Figura 5.9 - Simulación del consumo de combustible del secadero experimental en función del caudal de aire de curado para una masa de tabaco de 125,4 kg con contenido inicial de humedad del 87,54%	76

INDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1.1 - Distribución de la producción mundial de tabaco en rama por continentes, año 1993	8
Tabla 1.2 - Principales países productores de tabaco en rama, año 1993	9
Tabla 1.3 - Distribución de la producción mundial de tabaco en rama por tipo, año 1993	10
Tabla 1.4 - Principales países consumidores de tabaco en rama seco, año 1993	10
Tabla 1.5 - Principales países productores de cigarrillo, año 1993	11
Tabla 1.6 - Cuota de producción de tabaco en rama de España en la CE	13
Tabla 1.7 - Distribución de la producción de tabaco en rama en España, año 1994	16
Tabla 3.1 - Fases del curado del tabaco Virginia	22
Tabla 3.2 - Valores relativos de los parámetros del balance energético del proceso de curado	27
Tabla 5.1 - Caudales del aire de curado por kg de tabaco fresco en los secaderos de dos y cuatro bandejas y un secadero comercial de tabaco	50
Tabla 5.2 - Promedio de los resultados preliminares referentes a 4 ensayos con el secadero experimental durante la campaña de tabaco de 1993 (11/08 al 11/11/93)	51
Tabla 5.3 - Fechas de los ensayos de la campaña del tabaco de 1994 con la indicación del piso foliar recogido y el tiempo de curado	52
Tabla 5.4 - Promedio de los resultados referentes a masa inicial, masa final, y contenido de humedad del tabaco, obtenidos en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la campaña del tabaco de 1994.	53

Tabla 5.5 - Matriz de correlaciones de las variables del modelo de regresión múltiple m_T según el método de Pearson	56
Tabla 5.6 - Promedio de los resultados referentes a caudal de aire de curado obtenidos en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la campaña del tabaco de 1994	62
Tabla 5.7 - Promedio de los resultados referentes a consumo de energía observados en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la campaña del tabaco de 1994	63
Tabla 5.8 - Resultados de los análisis químicos realizados en las muestras sacadas del secadero experimental y del secadero del cultivador (testigo), durante los ensayos desarrollados en la campaña del tabaco de 1994	66
Tabla 5.9 - Matriz de correlaciones, según el método de Pearson, entre las variables del modelo de estimación de la temperatura del aire de curado después de pasar por la masa de tabaco en el secadero experimental	70
Tabla 5.10 - Matriz de correlaciones, según el método de Pearson, entre las variables del modelo de estimación de la humedad relativa del aire de curado después de pasar por la masa de tabaco en el secadero experimental	72

RESUMEN

En España, en la provincia extremeña de Cáceres, alrededor de 20.000 familias se dedican al cultivo del tabaco, que es la pieza más importante del valor de la producción final agraria de la Comunidad de Extremadura. Para apoyar a los cultivadores de tabaco de la región está CETARSA, que desarrolla una importante labor dirigida a la mejora de la calidad de los tabacos para hacerlos más competitivos en el mercado. Hay que destacar sus investigaciones para el ahorro energético en el proceso de curado en secaderos de tabaco tipo Virginia en el valle del Tiétar.

El proceso de curado en secaderos de tabaco Virginia es, entre los procesos de secado de productos agrícolas, el que más energía utiliza. Mientras el secado de granos suele consumir 7 litros de gasóleo por tonelada de producto seco, el curado de tabaco consume 670 litros por tonelada del producto ya curado. Más del 90% de la energía empleada en la producción del tabaco es consumida durante el proceso de curado.

Con el fin de aportar nuevas experiencias para el ahorro energético en el proceso de curado en secaderos de tabaco Virginia, se desarrolló un secadero experimental de dos bandejas. El objetivo de esta tesis es ponerlo a punto, para que reproduzca las mismas condiciones de curado de los secaderos comerciales y obtenga un producto con la misma calidad.

A partir de los ensayos realizados en los años 93 y 94 en el valle del Tiétar, se pudo proponer un modelo para predecir, a lo largo del proceso de curado, **a.** la masa del tabaco, **b.** las

condiciones del aire de curado (temperatura y humedad relativa) después de pasar por las bandejas que contiene el producto, y c. el consumo de combustible. Según las validaciones realizadas, las ecuaciones del modelo (con R^2 ajustado por encima del 0,90) se mostraron adecuadas para calcular, a lo largo del proceso de curado, los parámetros anteriormente referidos.

Al final de la investigación, se pudo concluir que el consumo medio de combustible (2,1 kg.kg⁻¹ de tabaco curado) del secadero experimental fue más grande que el valor tomado como referencia por Suggs *et al* (1992), el 0,61 kg.kg⁻¹ de tabaco curado. Esto tiene como causas: **a.** el problema para mantener alta la humedad relativa durante el amarilleo, y **b.** caudal medio del aire de curado por encima del valor recomendado para se obtener un curado óptimo, el 1,8 m³.h⁻¹.kg⁻¹ tabaco fresco. Por ello, se puede suponer que los secaderos de la región del valle del Tiétar, que utilizan caudales superiores a aquél recomendado, estarán consumiendo más energía para obtener la misma cantidad de producto.

SUMMARY

In Spain, in the Province of Cáceres, around 20.000 families are devoted to the cultivation of tobacco, that it is the most important piece of the final agrarian production of the Community of Extremadura. CETARSA supports the farmers of tobacco of the region developing an important work directed to the improvement of the quality of the tobacco in order to make it more competitive in the market. One must highlight their investigations about the energy saving in the process of Virginia tobacco curing in the dryers of valley of the Tiétar.

Tobacco curing is the most energy intensive of any agricultural drying process. Cereal grain drying requires 7 liters of diesel per tonne of cured conditioned tobacco compared to tobacco curing at around 670 liters of diesel per tonne. More than the 90% of the energy employed in the production of the tobacco is consumed during the curing process.

An experimental dryer with two racks was developed to contribute to find new experiences for energy saving in the process of Virginia tobacco curing. The objective of this thesis is to fine-tune it to reproduce the same curing conditions of the commercial dryers and get a product with the same quality.

From the tests developed in the years 93 and 94 in the Tiétar's valley, one could propose a model in order to predict, along the process of curing: **a.** the mass of tobacco, **b.** the curing air conditions (temperature and relative humidity) after passing for the racks that contains the

product, and c. the fuel consumption. According to the validations, the equations of the model (with adjusted R^2 equal to the 0,90) were shown adequate in order to calculate, along the process of curing, the parameters previously referred.

At the end of the investigation, one could conclude that the mean consumption of fuel (2.1 kg.kg^{-1} of cured tobacco) of the experimental dryer was greater than the reference value by Suggs *et al* (1992), 0.61 kg.kg^{-1} of cured tobacco. The causes can be: **a.** the problems in order to maintain high the relative humidity during the yellowing, and **b.** the mean flow of the curing air was greater than the recommended value for a optimum curing, $1.8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ fresh tobacco. Due to it, one could suppose that the dryers of the region of the Tiétar's valley, that utilize the curing air flow greater than the recommended value, would be consuming more energy in order to get the same quantity of product.

1. INTRODUCCIÓN

Era el 2 de noviembre de 1492. Los andaluces Rodrigo Jerez y Luis de Torres exploraban Cuba. No localizaron la majestad del Gran Khan ni el oro que buscaba Colón. Pero encontraron otro tesoro inagotable: el tabaco. Al regresar Rodrigo a su villa natal de Ayamonte, la Inquisición le persiguió por su muy extraño hábito de echar humo por la boca y la nariz, lo que le asemejaba a un ente diabólico.

Francisco C. Bedriñaña, 1952.

1.1 Importancia Económica del Tabaco

El tabaco en rama es, probablemente, el producto no alimenticio, cuyo cultivo es el más extendido por el mundo. En la producción mundial del tabaco en rama están involucrados 33 millones de cultivadores de 117 países de los cuales 94 son países en desarrollo (Campbell, 1994). Además, casi todos los países participan en el comercio internacional de tabaco en rama y de sus productos manufacturados (FAO, 1990).

Como resultado de las mejoras tecnológicas y de la creciente productividad, entre 1976 y 1987 la superficie mundial destinada al cultivo del tabaco disminuyó en 10 % para situarse en 4,3 millones de hectáreas. Sin embargo, durante ese período la producción subió a 6,2 millones de toneladas, es decir un 17 % (FAO, 1990).

La superficie destinada al tabaco representa una proporción muy pequeña (0,3%) de la superficie de labranza o destinada a cultivos permanentes en todo el mundo, frente al 9-16 %

destinado a cereales para consumo humano, algo más del 2 % al algodón y el 0,7 % al café (FAO, 1990).

La mano de obra que interviene en la producción de tabaco en rama y en la manufactura del tabaco es de considerable importancia, especialmente en varios países en desarrollo donde el cultivo del tabaco, al ser una actividad que requiere gran concentración de mano de obra, es una fuente de empleo rural en gran escala. Las necesidades de mano de obra, en algunos casos con carácter estacional, son tales que, con frecuencia, permiten dar empleo a jornaleros sin tierra. Por ejemplo, en China, principal productora de tabaco, se dedican a su cultivo aproximadamente 16 millones de personas, lo que representa el 2 % del total de la población dedicada a la agricultura. También en los países desarrollados, pese a que las explotaciones están mecanizadas, el tabaco proporciona empleo a un elevado número de personas. En los EE.UU., más de 600.000 familias rurales participan directamente en el cultivo del tabaco, aunque también cultivan otros productos. Además alrededor de 77.000 personas se dedican a la elaboración de la hoja, y 228.000 trabajan en el sector de la venta y distribución de los productos de tabaco (FAO, 1990).

En España, en la provincia extremeña de Cáceres, alrededor de 20.000 familias se dedican al cultivo del tabaco (Tabaco y Noticias, 1994) que es la pieza más importante del valor de la producción final agraria de la Comunidad de Extremadura: en 1994, del global de 192.143 millones de pesetas a que ascendió el valor de la producción final agraria, 15.760 millones de pesetas correspondieron al sector tabaquero (Tabaco y Noticias, 1995). El sector del tabaco mueve en torno al billón y medio de pesetas anuales en España, resaltando que Hacienda se lleva el 73 % del precio de cada cajetilla vendida en el territorio nacional. (Gil *et al*, 1995).

1.2 El Mercado de Tabaco en el Mundo.

Según evaluación de la Federación Nacional de Cultivadores de Tabaco (FNCT, 1994), el mercado de tabaco en el mundo ha experimentado, durante 1993, pequeñas modificaciones en lo que se refiere a producción y superficie cosechada. Las mayores alzas productivas se han dado en los continentes compuestos de países en vías de desarrollo. En las zonas más desarrolladas, como ya viene siendo tradicional, ha descendido la producción de tabaco en rama y también la de cigarrillos y el consumo de tabaco en rama.

La producción mundial de tabaco en rama ascendió durante 1993 a 8.345.268 toneladas, cifra superior a la del año anterior en un 0,25%. En la Tabla 1.1 (FNCT, 1994) se ofrece la distribución por continentes. El primer lugar correspondió a Asia con el 62,84% del total mundial, seguido del Norte y Centro de América con el 11,48%. Después aparecen Sudamérica, Europa y resto con cifras inferiores. Por países, el primer lugar correspondió a China Popular, como se indica en la Tabla 1.2 (FNCT, 1994), cuya producción representa el 41,42% del total mundial. A continuación en orden de importancia aparecen: EE.UU. con el 8,77%; Brasil, 7,28%; India, 6,96%, y el resto de los países con cifras inferiores. España se halla en el lugar 26. Como primeros países de la CE aparecen Italia y Grecia. La distribución de la producción mundial por tipos de tabaco aparece recogida en la Tabla 1.3 (FNCT, 1994).

Por lo que se refiere a la superficie cultivada de tabaco en rama, el aumento observado fue del 0,97%, hasta alcanzar una cifra de 5.331.387 ha durante el año 1993. Observando la Tabla 1.1, respecto al año anterior, se aprecian reducciones solamente en Europa (8,06%) y Oceanía (6,38%).

El consumo de tabaco en rama seco en el mundo durante el año de 1993 ascendió a 6.991.975 toneladas, cifra que significó un aumento del 2,8% respecto al año anterior. Los principales países consumidores aparecen en la Tabla 1.4 (FNCT, 1994), donde China Popular ocupa el primer puesto con el 41,64% del total mundial. España, por su parte, se halla en el puesto catorce con el 1,19% del total mundial. Los primeros países de la CE son Alemania e Inglaterra.

La producción mundial de cigarrillos en 1993 descendió en un 0,97% respecto al año anterior situándose en 5.294.018 millones de piezas. En la Tabla 1.5 (FNCT, 1994) figuran los principales países productores de cigarrillos, siendo China Popular el primer productor con el 31,64% del total mundial. España, con una producción de 82.135 millones de piezas (1,55% del total mundial), ocupa el puesto número doce.

Tabla 1.1 - Distribución de la producción mundial de tabaco en rama por continentes, Año 1993

Continente	Superficie Cosechada			Producción		
	Hectáreas	% del total	$\Delta(\%)$ 93/92	Tm	% total	$\Delta(\%)$ 93/92
Asia	3.590.803	67,35	+1,75	5.244.123	62,84	-0,80
Norte y Centro América	458.521	8,60	+2,55	958.337	11,48	-0,43
Europa	440.844	8,27	-8,06	808.750	9,69	+1,84
Sudamérica	478.894	8,98	+3,42	821.347	9,84	+5,50
África	357.189	6,70	+1,92	498.711	5,98	+3,42
Oceanía	5.136	0,01	-6,38	14.000	0,17	-6,42
Total Mundial	5.331.387	100,00	+0,97	8.345.268	100,00	+0,25

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994).

Tabla 1.2 - Principales países productores de tabaco en rama, año 1993.

Nº de Orden	País	Producción (Tm)	% del Total
1	China Popular	3.456.600	41,42
2	EE.UU.	731.921	8,77
3	Brasil	608.000	7,28
4	India	580.600	6,96
5	Turquía	326.104	3,91
6	Zimbabwe	235.286	2,82
7	Indonesia	152.800	1,83
8	Malawi	133.798	1,60
9	Italia	132.308	1,58
10	Grecia	130.754	1,56
11	Argentina	114.000	1,37
12	Corea del Sur	106.493	1,28
13	Pakistán	105.966	1,27
14	Filipinas	102.243	1,23
15	Tailandia	102.000	1,22
16	Canadá	83.760	1,00
17	México	71.420	0,86
18	Japón	67.430	0,81
19	Moldavia	65.000	0,78
20	Azerbaijan	63.250	0,76
21	Yugoslavia	55.833	0,67
22	Kirgizstan	55.550	0,67
23	Bulgaria	49.697	0,59
24	Corea del Norte	46.000	0,55
25	Colombia	43.600	0,52
26	España	40.696	0,49
Total Anterior		7.661.109	91,80
Resto Países		684.159	8,20
Total Mundial		8.345.268	100,00

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994)

Tabla 1.3 - Distribución de la producción mundial de tabaco en rama por tipos, año 1993.

Tipo tabaco	Superficie Cosechada			Producción		
	Hectáreas	% del total	$\Delta(\%)$ 93/92	Tm	% total	$\Delta(\%)$ 93/92
Virginia	3.004.253	56,35	-1,75	5.169.051	61,94	-0,45
Burley	567.223	10,64	+5,48	1.035.937	12,41	+5,08
Oriental	633.142	11,88	-3,41	826.691	9,91	+8,45
Light air-cured	53.250	1,00	-4,31	77.958	0,93	-1,79
Dark air-cured	934.278	17,52	+12,68	1.102.079	13,21	+14,72
Dark fire-cured	32.052	0,60	-31,13	46.776	0,56	-12,18
Dark air-cured para puros	107.189	2,01	+10,27	86.776	1,04	-20,26
Total Mundial	5.331.387	100,00	+0,97	8.345.268	100,00	+0,25

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994)

Tabla 1.4 - Principales países consumidores de tabaco en rama seco, año 1993.

Nº de Orden	País	Consumo (Tm)	% del Total
1	China Popular	2.911.529	41,64
2	EE.UU.	793.000	11,34
3	India	426.025	6,09
4	Alemania	175.258	2,51
5	Japón	175.200	2,51
6	Brasil	143.000	2,05
7	Indonesia	139.733	2,00
8	Turquía	135.000	1,93
9	Gran Bretaña	133.317	1,91
10	Rusia	125.000	1,79
11	Pakistán	93.103	1,33
12	Holanda	86.600	1,24
13	República de Corea	84.227	1,20
14	España	83.490	1,19
15	Polonia	83.000	1,18
16	Grecia	73.340	1,05
17	Filipinas	69.276	0,99
18	Italia	55.791	0,80
19	Canadá	55.591	0,80
20	Yugoslavia	43.000	0,61
Total Anterior		5.884.480	84,16
Resto Países		1.107.495	15,84
Total Mundial		6.991.975	100,00

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994)

Tabla 1.5 - Principales países productores de cigarrillos, año 1993.

Nº de Orden	País	Nº Piezas (millones)	% del Total
1	China Popular	1.675.000	31,64
2	EE.UU.	661.000	12,49
3	Japón	295.100	5,57
4	Alemania	207.714	3,92
5	Indonesia	162.400	3,07
6	Brasil	149.119	2,82
7	Turquía	132.000	2,49
8	Gran Bretaña	128.557	2,43
9	Corea del Sur	96.900	1,83
10	Polonia	87.000	1,64
11	Holanda	84.251	1,59
12	España	82.135	1,55
Total Anterior		3.761.176	71,04
Resto Países		1.532.842	28,96
Total Mundial		5.294.018	100,00

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994)

1.3 El Tabaco en España

Precisamente es en Extremadura y más concretamente en la provincia de Cáceres, en los valles del Tiétar y el Jerte, donde se encuentra el corazón del cultivo de tabaco en España (Tabaco y Noticias, 1994). Esta provincia produce el 82 % del tabaco que se cultiva en el país. Otras zonas cultivadoras de España son Ávila, Granada, Sevilla, Logroño, Navarra y Jaén, que se reparten el 18 %, aproximadamente, de la producción nacional (Jaraíz, 1992).

La implantación del tabaco en la comarca de La Vera, en Cáceres, no fue casualidad, ya que en ella está enclavado el Monasterio de Yuste, de la Orden Jerónima, que poseía extensos huertos para el cultivo de la nueva planta. Los frailes de Yuste tuvieron un relevante cometido en el descubrimiento del Nuevo Mundo y, lógicamente, han tenido mucho que ver en la implantación del tabaco en La Vera. De vital importancia para la implantación definitiva del cultivo del tabaco fue una memoria escrita por José Clemente Carnicero, oficial del Archivo de la Secretaría de Gracia y Justicia de Indias, donde escribió sobre la conveniencia de aclimatarlo en España para destruir el contrabando que tenía lugar, indicando, además, que los terrenos para el cultivo eran los de La Vera, de Plasencia; los comprendidos entre Mérida y Badajoz; cercanías de Córdoba; algunos valles de la Serranía de Ronda; los Hoyos de Málaga y algunos puntos de Murcia. Luego la pérdida de las colonias, Cuba y Filipinas, dio fuerza al cultivo en España, especialmente en la comarca de La Vera, que fue declarado el mejor tabaco de Europa. Y ya, en 1947, la Ley de Autorizaciones dio pie a la creación de la Compañía Arrendataria del Tabaco. A partir de este instante comenzó el gran milagro de la agricultura extremeña (Jaraíz, 1992).

El 10 de abril de 1987 fue creada CETARSA (Compañía Española de Tabaco en Rama, S.A.) al abrigo del Real Decreto 573, como sociedad estatal de naturaleza mercantil en régimen de derecho privado. Surge tras la incorporación de España a la Comunidad Europea con la finalidad de contribuir a los objetivos de la política tabaquera nacional, con criterios de rentabilidad y en concurrencia con otras empresas, a la demanda nacional e internacional de tabaco en rama. Fue el momento en el que se desmonopolizaron el proceso productivo, la primera transformación y la comercialización del tabaco en rama (Tabaco y Noticias, 1994). El objeto social de la Compañía es la adquisición, fermentación, procesado, batido, acondicionamiento y comercialización en los distintos mercados del tabaco en rama, para lo que cuenta con centros

industriales distribuidos por toda la geografía nacional, especialmente en Extremadura y Andalucía, y está facultada para realizar contratos con los productores para la adquisición de la cosecha y prestarles asistencia técnica con el fin de mejorar la calidad de los productos.

En un contexto más amplio, el de la Comunidad Europea, la política viene marcada por la Organización Común del Mercado de Tabaco, una de cuyas principales características es la distribución de cuotas de producción entre los distintos países miembros. Así, en el caso de España, la CE le ha otorgado una cuota de 42.300 toneladas, así repartida, según la Tabla 1.6 (Tabaco y Noticias, 1994):

Tabla 1.6 - Cuota de producción de tabaco en rama de España en la CE.

Variedad	Cuota de Producción (ton)	% del Total Comunitario
Virginia	28.300	23,20
Burley fermentable y Havanna	9.000	18,30
Burley procesable	4.970	6,00

Uno de los fenómenos más notables en las últimas décadas en el campo de la producción mundial de tabaco ha sido el aumento de la producción de los tabacos tipo Virginia, también llamado *flue-cured*, a expensas de los tabacos de tipo oscuro curados al aire (FAO, 1990).

En el caso de España, el consumo de cigarrillos de tabaco rubio ha evolucionado desde el 25,5% del total en el año de 1980 al 63,04% en el año de 1994, mientras que para los cigarrillos de tabaco negro ha pasado del 74,5% al 36,96% en el mismo período (Figura 1.1). Paralelamente

ha habido un incremento de la producción de tabaco de las variedades utilizadas en la elaboración de cigarrillos rubios del 6,5% del total de la producción de tabaco en el año de 1981 al 68,48% en 1994, según la Figura 1.2 (CE, 1995 y De la Plaza *et al*, 1993).

La producción de tabaco en rama en España en el año de 1994 está reflejada en la Tabla 1.7, donde se observa que la cifra de 42.283 toneladas representó un aumento en la producción de 3,64% respecto al año anterior (CE, 1995). La superficie cultivada sufrió una reducción del 10,30% en relación al año de 1993, situándose la cifra en 15.959 hectáreas. En el ámbito de la CE, la producción de tabaco en rama de España y la respectiva superficie cultivada representaron, respectivamente, el 12,54% y el 10,77% del total comunitario.

La variedad Virginia, por razones de rentabilidad, se cultiva en fincas de tamaño medio, condición no requerida en el resto de variedades, que se cultivan en pequeños terrenos. El cultivo comienza en el semillero, produciéndose el trasplante a partir de los primeros días del mes de mayo, quedando el tabaco sobre el campo hasta finales de octubre en el caso de la variedad Virginia y hasta el 15 de septiembre en el resto de variedades.

La recolección de la variedad Virginia se realiza hoja por hoja, entre dos y tres hojas por pasada, trabajo que se repite cada semana, lo que permite un perfecto control de la calidad de la cosecha al seleccionarse pisos foliares. En el caso de la variedad Burley, la recolección se efectúa de manera diferente, cortándose la planta entera desde el principio del tallo para facilitar su curado. El curado de Burley se realiza en secaderos formados por amplias naves cerradas, con ventilación controlada, donde el tabaco se cura de forma tradicional en un proceso natural sin intervención de maquinaria alguna. Por su parte, el curado de la variedad Virginia se realiza en

cámaras de secado donde la humedad relativa y la temperatura del aire en su interior son controladas artificialmente.

CETARSA desarrolla una importante labor dirigida a la mejora de la calidad de los tabacos para hacerlos más competitivos en el mercado, por lo que, además de asignar ayudas económicas indirectas a los cultivadores en condiciones muy favorables, se desarrollan unos programas de asistencia técnica para que éstos accedan rápidamente a las modernas técnicas que se aplican en semilleros, cultivo, curado y selección del tabaco para lograr la calidad necesaria que permita, por un lado, mantener sus rentas y, por otro, asegurar su futuro.

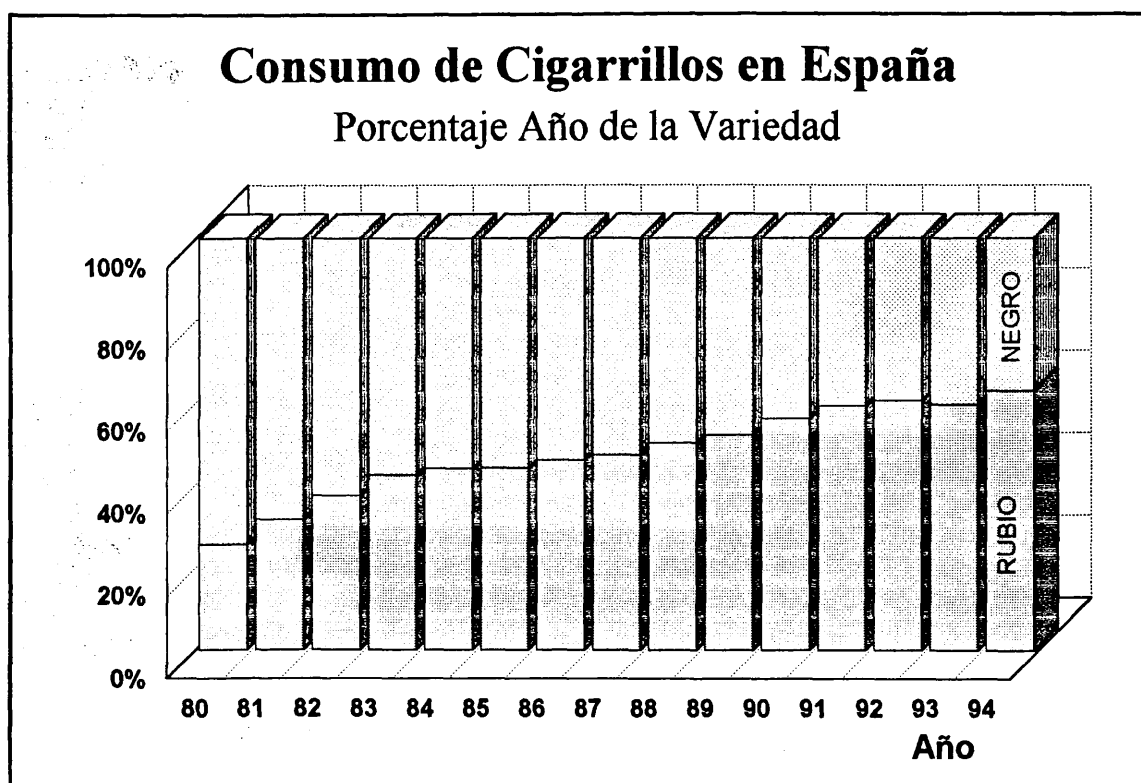


Figura 1.1 - Consumo de cigarrillos en España - porcentaje año de rubio y negro

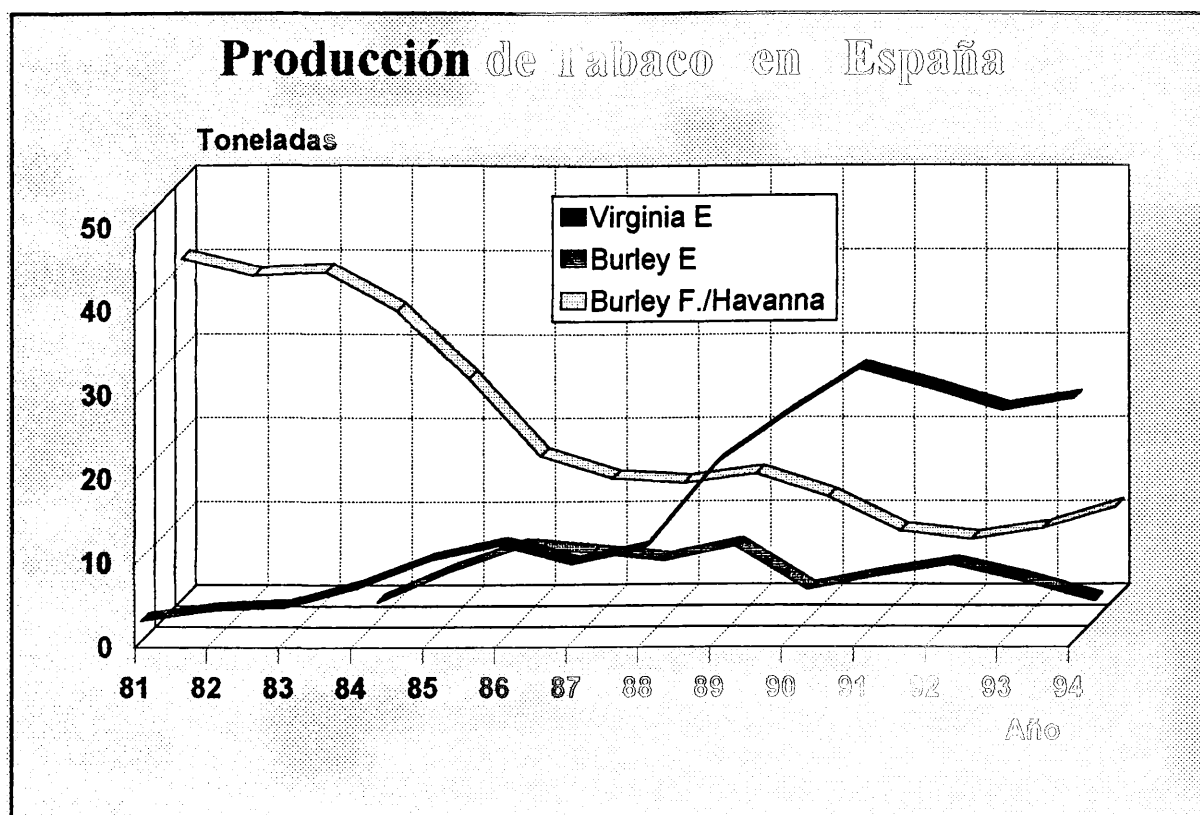


Figura 1.2 - Producción de tabaco en España (toneladas): año 1981 al año 1994.

Tabla 1.7 - Distribución de la producción de tabaco en rama en España, año 1994.

Tipo	Superficie Cultivada de Tabaco en Rama			Producción de Tabaco en Rama		
	ha	% del total	$\Delta(\%)$ 94/93	Ton	% del total	$\Delta(\%)$ 94/93
Virginia E	11.213	70,26	-10,68	28.954	68,48	+4,78
Burley E	835	5,23	-131,14	2.231	5,49	-102,02
Burley F / Havanna	3.899	24,43	+16,59	10.979	25,97	+22,90
Kentucky	12	0,08	+8,33	29	0,07	+27,59
Total	15.959	100,00	-10,30	42.283	100,00	+3,64

Fuente: Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco (1994).

2. OBJETIVOS

Los objetivos de esta tesis son los siguientes:

1. Poner a punto el secadero experimental de dos bandejas, desarrollado y construido por INDUSTRIA AGROTEX,S.L. para CETARSA I+D, para que reproduzca las mismas condiciones de curado de tabaco de los secaderos comerciales y obtenga un producto con la misma calidad.
2. Determinar el caudal de aire de curado y el consumo de combustible del secadero experimental, bajo las mismas condiciones en que trabajan los secaderos en las fincas del valle del Tiétar.
3. Establecer, mediante ensayos realizados con el secadero experimental, un modelo para predecir, a lo largo del proceso de curado, a. la masa del tabaco, b. las condiciones del aire de curado (temperatura y humedad relativa) después de pasar por las bandejas que contiene el producto, y c. el consumo de combustible.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 El Tabaco *Flue-Cured*.

La *Nicotiana tabacum* es, originariamente, una planta subtropical, cuyo sabor y aroma especiales eran conocidos en América central desde hace dos mil años. Se considera que la primera constatación del acto de fumar tabaco es el Hombre Viejo de Palenque, una escultura de piedra encontrada en México. El templo en el que se encontró esta escultura se construyó unos 600 años antes de Cristo (Hawks, Jr. y Collins, 1986a).

La palabra *tabaco* fue originariamente usada por los nativos para designar el tubo o la pipa en la que se fumaba la hoja. En México, en el este de EE.UU. y en Canadá, el tabaco cultivado y consumido era la planta *Nicotiana rustica*, de hoja estrecha, con un contenido muy alto en nicotina y tan amarga que se fumaba en pipa. Una planta de tabaco alta y de hoja ancha, *Nicotiana tabacum*, crecía en el norte y el este de América del Sur, y en América Central. Probablemente la planta *N. tabacum* tiene su origen en Brasil o en América Central (Hawks, Jr. y Collins, 1986a).

En los primeros años del siglo XIX, en los secaderos para curar al aire, se encendía fuego sobre el suelo con el fin de rebajar la humedad, y mejorar así las condiciones naturales del curado. En 1839, un empleado de la granja Slade en Caswell, Carolina de Norte (EE.UU), después de dejar casi apagarse el fuego en el secadero, añadió a éste carbón vegetal. El renovado golpe de calor curó el tabaco con un color más amarillo que el normal. Este tabaco de un color claro se

vendió a un precio cuatro veces superior al normal. El uso de calor para amarillear el tabaco y luego secar la hoja, como se practicaba en la granja Slade, es a menudo considerado como el principio del tabaco *Flue-Cured* (Hawks, Jr. y Collins, 1986a). A esta denominación internacional se puede añadir lo de tabaco tipo Virginia, también popularmente conocido como tabaco amarillo o tabaco rubio (Llanos, 1981).

3.2 El Curado del Tabaco Virginia

El tabaco, después de la cosecha, debe experimentar un proceso de transformación para convertirse en materia prima industrial, es decir, en un producto fumable (Llanos, 1981).

La primera condición para obtener un curado uniforme es empezar con tabaco uniformemente maduro. En condiciones normales, en la planta de tabaco Virginia maduran de dos a cuatro hojas por semana; así, el ritmo normal de recolección manual será de dos a cuatro hojas por planta y semana (Hawks, Jr. y Collins, 1986c).

Existen dos objetivos principales en el curado del tabaco Virginia. *Primero*, crear unas condiciones de temperatura y humedad para ayudar a que se produzcan en la hoja los cambios químicos y biológicos deseados. *Segundo*, conseguir que la hoja, por medio de un secado adecuado, pueda mantener su calidad potencial. Curar es más que un simple secado de la hoja. Implica cambios químicos y físicos, que son necesarios para obtener tabaco de alta calidad, que será el idóneo para ser aceptado por fabricantes y consumidores (Hawks, Jr. y Collins, 1986c).

Un curado realizado debidamente implica dos procesos, el biológico y el de secado. Una hoja de tabaco madura, cuando se arranca de la planta, es un complejo sistema viviente. Normalmente contiene del 80 al 90% de agua. Aproximadamente un 25% de la materia seca es almidón, y el 75% restante lo forman numerosos componentes bioquímicos, pigmentos, minerales, tejido celular, etc (Hawks, Jr. y Collins, 1986c). Los principales componentes químicos del tabaco son sustancias orgánicas, tales como ácidos orgánicos, alcaloides, bases orgánicas, otros componentes nitrogenados, hidratos de carbono, resinas y aceites esenciales. Las cantidades

absolutas y relativas de estas sustancias varían mucho con las variedades de tabaco, suelos, métodos de cultivo, madurez y condiciones climatológicas (Hawks, Jr. y Collins, 1986b).

La conducción del curado se desarrolla en 3 fases sucesivas desde que el tabaco se cuelga en el secadero hasta que está completamente curado (Pérez Carbonell, 1987). Las fases son el *amarilleo*, el *secado de la hoja* y el *secado de la vena* (Tabla 3.1).

Cada fase, para cumplir su objetivo específico, requiere valores definidos de temperatura y humedad relativa del aire en el interior del secadero, además del control del caudal de este aire. Existen varios programas de curado para secaderos, es decir, valores de temperatura seca y húmeda a lo largo del curado, que pueden dar buenos resultados, en cuanto a obtención de tabaco de calidad y ahorro de energía (Hawks, Jr. y Collins, 1986c).

En la fase de amarilleo hay que mantener la hoja con vida hasta que tengan lugar ciertos procesos biológicos. Durante esta fase, debe ocurrir en las hojas del tabaco: **a.** la desaparición de la clorofila; **b.** la conversión del almidón en azúcares; **c.** la pérdida lenta de humedad, perdiendo normalmente el 20% de la humedad que tenía en el momento de la recolección (Hawks, Jr. y Collins, 1986c; Hawks, Jr., 1986).

Tabla 3.1 - Fases del Curado del Tabaco Virginia.

Fases del Curado del Tabaco Virginia		
Amarilleo	Secado de la Hoja	Secado de la Vena
<i>Síntomas del Tabaco al Final de cada Fase</i> ⁽¹⁾		
* Color amarillo uniforme en la base de la vena; * Hojas lacias y marchitas con las puntas secas.	* Las hojas al tocarlas crujen y se rompen.	* Las venas principales deben secarse hasta que casquen al doblarlas.
<i>Programa de Curado</i> ⁽¹⁾		
Tbs = 38 °C Tbh = 37 °C Hr = 90-95 %	Tbs = 54 °C Tbh = 38 °C Hr = 37 %	Tbs = 71 °C Tbh = 41 °C Hr = 19 %
<i>Duración de la Fase</i> ⁽²⁾		
36 - 48 horas	48 horas	36 - 48 horas

⁽¹⁾ Pérez Carbonell, 1987. ⁽²⁾ Hawks, Jr., 1986.

El programa de temperatura y humedad seguido durante el amarilleo y el tiempo que el tabaco tarde en amarillear, pueden tener una gran influencia sobre el rendimiento y la calidad del tabaco *flue-cured*. De hecho, el amarilleo está considerado como la fase más importante del proceso de curado del tabaco (Pérez Carbonell, 1987; Hawks, Jr. y Collins, 1986c; Llanos, 1981). Según Pérez Carbonell (1987), si el amarilleo fue realizado sin prisa por el cultivador, estando las hojas uniformemente maduras y con savia, el resto del curado no tendrá ningún problema, y se alcanzará la máxima calidad potencial del tabaco.

El secado de la hoja es la fase en que ocurre la *fijación del color* que empezó a manifestarse en la fase anterior. Se incrementa la tasa de secado hasta que el tejido foliar se seque; la hoja muere y se detienen los cambios químicos y biológicos (Hawks, Jr., 1986).

En la fase del secado de vena, el objetivo es extraer completamente la humedad de la vena central para preservar la hoja (Hawks, Jr. y Collins, 1986c).

Actualmente, los sistemas de curado del tabaco Virginia empleados en las fincas son, de modo general, secaderos para grandes cantidades de masa (*Bulk-curing*) con sistemas de ventilación forzada y control automático del proceso.

Según la manera de cargar los secaderos, el sistema puede ser con bandeja o con contenedores. En el sistema con bandejas las hojas están colgadas y fijadas por pinchos a una bandeja, mientras en el otro tipo, se colocan (al azar y sin fijación) en grandes cajas o contenedores. Con la mecanización de la recogida de las hojas de tabaco en la planta, las modernas máquinas cosechadoras cortan las hojas de los diversos pisos y las recogen en los contenedores, que irán directamente al secadero, produciéndose una disminución notable en la mano de obra, respecto al sistema más clásico de colocación en bandejas. Los secaderos con bandeja tiene una cámara de curado, en general, con 3 pisos donde se apoyan las bandejas. Sus capacidades pueden variar desde 48 hasta 150 bandejas por secadero. Los secaderos con contenedores tiene una capacidad que puede variar de 7 a 12 contenedores (De la Plaza *et al*, 1993).

El sistema de calentamiento del aire de curado de los secaderos de las fincas españolas suele utilizar básicamente 2 tipos de combustibles: gasóleo o propano. Pero hay algunas fincas con secaderos que utilizan la bomba de calor para calentar el aire (De la Plaza, 1988).

En la Figura 3.1 se muestran las posibilidades que tiene el aire para moverse en el interior de un secadero de tabaco Virginia. El aire que retorna de la cámara de curado (aire de retorno) y el aire ambiente que entra se mezclan en el sistema de calentamiento del secadero formando el aire mezcla. El aire mezcla es entonces calentado y forzado a pasar a través de la masa de tabaco donde toma humedad. Después de pasar por el tabaco, una parte es expulsada al exterior del secadero y la otra parte, que permanece en la cámara de curado retorna al sistema de calentamiento y se mezcla con el aire ambiente. La cantidad de aire ambiente que entra es suficiente para reponer el aire expulsado. El aire mezcla se calienta nuevamente, y el ciclo continúa.

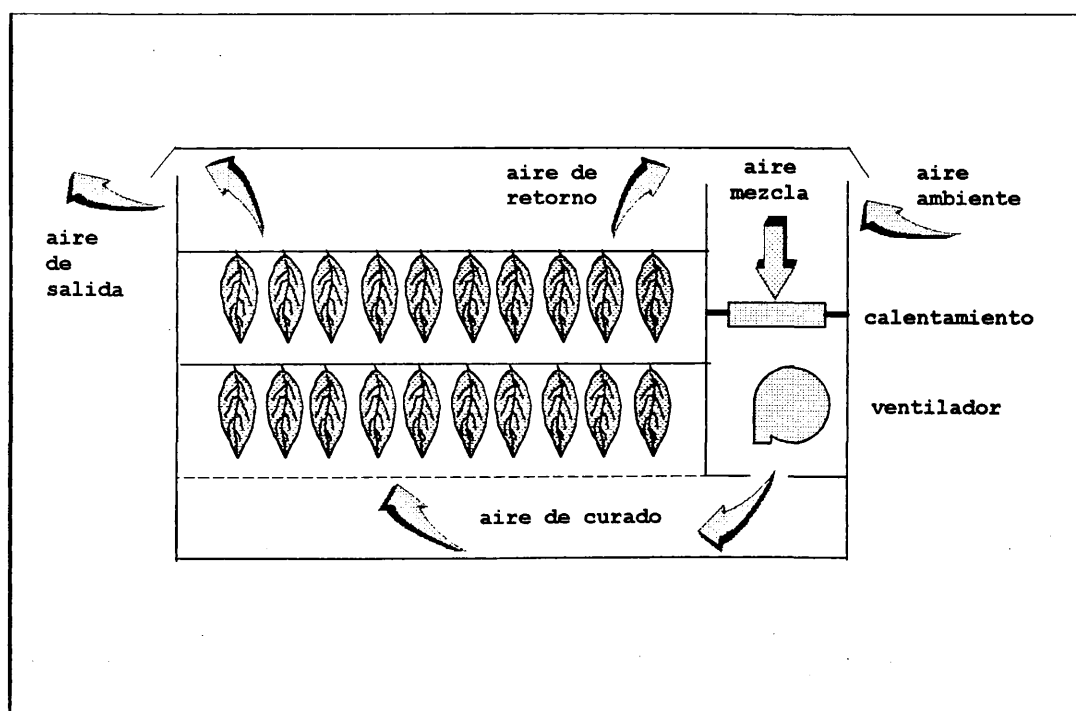


Figura 3.1 - El aire en el interior de un secadero de tabaco Virginia

3.3 Análisis Energético del Proceso de Curado

El proceso de curado en secaderos de tabaco Virginia es, entre los procesos de secado de productos agrícolas, el que más energía utiliza (De la Plaza *et al*, 1993; Yang, 1983; Ryan *et al*, 1988; Yang *et al*, 1984; Christenbury, 1992; Cundiff *et al*, 1981). Según Ryan *et al* (1988), mientras el secado de granos suele consumir 7 litros de gasóleo por tonelada de producto seco, el curado de tabaco consume 670 litros por tonelada del producto ya curado.

Más del 90% de la energía empleada en la producción del tabaco es consumida durante el proceso de curado (Christenbury, 1992).

Los gastos con combustible derivados del petróleo en el proceso de curado representan el 15-20% de los costes directos de producción (Ryan *et al*, 1988; Hawks *et al*, 1986).

El curado de tabaco Virginia es particularmente un proceso de consumo intensivo de energía a causa del alto contenido de humedad de las hojas (80-90% base húmeda, bh) cuando son introducidas en el secadero. Por lo tanto, la cantidad de agua que hay que eliminar del producto durante el proceso es muy importante: al rededor de 5 a 10 kg de agua deben ser evaporados por cada kilo de tabaco curado (Suggs *et al*, 1992).

Cundiff *et al* (1981) propuso un modelo energético que, aplicando la teoría de transferencia de calor y masa, describe la utilización de la energía durante el proceso de curado del tabaco Virginia en un secadero.

En el balance energético propuesto por Cundiff *et al* (1981), la energía que entra en el sistema de curado es:

1. la energía generada por el combustible utilizado por el secadero, Q_C ;
2. la energía generada por la respiración del tabaco y por las complejas reacciones químicas que se producen en la hoja durante el curado, Q_R .

Esta energía suministrada al sistema es consumida para:

1. aumentar y mantener la temperatura del tabaco, Q_T ;
2. variar la entalpía del aire exterior que se mueve por todo el sistema de curado, Q_A ;
3. aumentar y mantener la temperatura de la estructura de la cámara de curado, Q_E .

Asumiendo que la transferencia de calor en un intervalo de tiempo finito ocurre bajo régimen estacionario, el siguiente balance energético debe ser satisfecho durante el curado de tabaco Virginia:

$$Q_C + Q_R = Q_T + Q_A + Q_E \quad (3.1)$$

Los datos obtenidos por Cundiff *et al* (1981), referentes a los parámetros del balance reflejados en la Ecuación 3.1, son comparados con otros investigadores en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 - Valores relativos de los parámetros del balance energético del proceso de curado

Autor	Q_C (%)	Q_R (%)	Q_T (%)	Q_A (%)	Q_E (%)
Cundiff <i>et al</i> (1981)	82-88	12-18	2	64-67	35-38
Yang (1983)	91,4	8,6	3,4	81,5	15,1
Ryan <i>et al</i> (1988)	90	10	3	65	32

Con el objetivo de ahorrar energía y disminuir el consumo de combustible, es decir, disminuir Q_C en la Ecuación 3.1, se han propuesto sistemas complementarios para el calentamiento del aire, como la utilización de:

1. Colectores solares que precalientan el aire antes de entrar en el sistema de combustión;
2. Intercambiadores de calor para precalentar el aire ambiente, recuperando el calor del aire que sale de la cámara de curado.

La utilización de colectores solares en sistemas de curado de tabaco Virginia puede proporcionar el 5,8% de la energía total que se suministra al proceso (Yang, 1983).

Cundiff (1983), afirma que se puede sacar el máximo rendimiento de un colector solar cuando se aplican estrategias de control del caudal de aire ambiente que entra en el sistema de curado, es decir, controlando la tasa de ventilación del secadero en función de la hora del día y de la fase del proceso de curado. Según sus conclusiones, se puede conseguir que la energía solar aporte el 37% de la energía total que el proceso de curado requiere.

Yang *et al* (1982), empleando un intercambiador de calor en un secadero experimental con 3 cámaras de curado, recuperaron el 13,5% de la energía total, con un rendimiento del intercambiador del 70,7%. En otras condiciones, Yang *et al* (1984b), consiguieron recuperar el 22% de la energía total del curado. Ryan, citado por Suggs (1991), obtuvo cifras de recuperación de energía del 12,5% de la energía requerida para el curado del tabaco. Y Suggs (1991), en un experimento con intercambiador de calor, ahorró del 6 al 12% del combustible derivado de petróleo.

Hay sistemas que utilizan la bomba de calor en sustitución al sistema convencional de energía generada por combustión. La bomba de calor recupera el calor latente de vaporización y la humedad eliminada del tabaco en el interior de la cámara de curado. Su utilización supone un ahorro en los costes de energía del 35% respecto a los sistemas de curado que utilizan el gasóleo C como combustible (De la Plaza, 1988).

El combustible consumido en el curado es hoy en día un gasto fundamental en la producción del tabaco *flue-cured*. Por su naturaleza, como se ha comentado anteriormente, el proceso de curado de tabaco amarillo consume mucha energía, pero muchos cultivadores gastan más del doble de la cantidad necesaria (Hawks *et al*, 1986c).

Las recomendaciones para el curado encaminadas al ahorro energético son (Hawks *et al*, 1986c; Christenbury, 1992; Suggs, 1993; Boyette, 1993):

1. *Llenar el secadero sólo con tabaco maduro.*

El tabaco verdaderamente maduro requiere un tiempo de curado más corto y esto significa menor necesidad de energía.

2. *Evitar las fugas de aire caliente.*

Después de algunos años, incluso los secaderos de los mejores constructores, presentarán grietas y fisuras. Las puertas son particularmente una fuente de problemas de mantenimiento, necesitando una revisión periódica de las juntas. Una grieta de 6,4 mm de ancho y 4,54 m de largo entre el piso de cemento y las paredes puede aumentar los costes del curado en 10%.

3. *Mejorar el aislamiento térmico cuando sea necesario.*

Normalmente un secadero con una cámara de curado bien aislada térmicamente utiliza solamente al rededor del 60% de la energía aportada por el combustible. Lo restante de la energía se pierde por conducción y radiación a través de las paredes o por los puntos donde hay fugas de aire. La experiencia ha demostrado que el mejor aislante térmico para toda la cámara de curado es una capa de 1,3 a 2,0 cm de poliuretano.

4. *Controlar la ventilación en la cámara de curado en función del termómetro de bulbo húmedo.*

Aunque un secadero tenga un aislamiento adecuado y un buen mantenimiento, desperdiciará combustible si es manejado incorrectamente. El termómetro de bulbo húmedo permite regular la cantidad de aire ambiente que debe entrar en la

cámara de curado. Debe abrirse la trampilla para la entrada de aire exterior sólo lo imprescindible para mantener la humedad relativa al nivel conveniente y de acuerdo con el programa de curado elegido. La ventilación en exceso aumenta innecesariamente el consumo de combustible y puede comprometer la calidad final del producto.

5. *Llenar uniformemente las bandejas o los contenedores.*

Llenar uniformemente quiere decir que no queden zonas de hojas muy apretadas o muy holgadas. Así se garantiza un curado más rápido y uniforme porque el aire atravesará igualmente toda la masa de tabaco, asegurando un producto de mejor calidad con un menor consumo energético. Según Cundiff *et al* (1981) la máxima *densidad de llenado* recomendada para secaderos tipo bandeja es 240 kg.m^{-3} . Suggs *et al* (1987), estudiando el curado de tabaco amarillo en bandejas y en contenedores, utilizó densidades de llenado entre 218 y 326 kg.m^{-3} y concluyó que un cierto aumento en este parámetro tiende a mejorar la eficiencia del proceso, principalmente con las hojas del primer piso de la planta.

6. *Eliminar los espacios abiertos entre las bandejas o los contenedores.*

Los espacios abiertos generan una desviación del caudal de aire hacia ellos, reduciendo la cantidad de aire a través del tabaco. Una separación de $1,25 \text{ cm}$ entre contenedores reduce la eficiencia de la ventilación en un 50%.

7. *Revisar el funcionamiento del quemador de gasóleo o gas.*

Un quemador funcionando fuera de su punto ideal puede consumir un 15% o más de combustible.

8. *Emplear el caudal de aire adecuado.*

Según Suggs *et al* (1985) la recomendación de caudal para obtener un curado óptimo es $1,80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ de tabaco fresco. En condiciones típicas de curado, una capa de hojas de tabaco de 1,2 a 1,6 m desarrolla una presión estática de 125 Pa. Después de que las hojas se marchiten, la resistencia ofrecida por las mismas al flujo de aire disminuye y continúa disminuyendo a medida que el secado avanza. Al final del curado la presión estática, que disminuye con la disminución de la resistencia ofrecida por las hojas, puede ser menor de 25 Pa. La densidad de llenado de la cámara de curado y la altura de la capa de hojas son variables que afectan el caudal de aire a través de la masa de tabaco: cuanto mayor su valor mayor será la resistencia ofrecida al flujo de aire (Reid *et al*, 1975; Chang *et al*, 1978; Suggs *et al*, 1985; Suggs *et al*, 1986; Suggs *et al*, 1987; Suggs *et al*, 1989).

3.4 Simulación del Proceso de Curado

La simulación matemática es de trascendental importancia en el diseño y optimización de los procesos de ingeniería. Un programa de simulación por ordenador puede ser una herramienta extremadamente útil para el ingeniero, porque, rápidamente y con un bajo coste, determinará los efectos del cambio de varios parámetros en el funcionamiento del sistema estudiado.

La simulación del secado de productos agrícolas básicamente se define como la utilización de modelos matemáticos en la evaluación del comportamiento de este proceso bajo determinadas condiciones permitiendo el diseño y análisis de proyectos de secaderos y ayudando en el planteamiento de la operación de sistemas de secado y de otras operaciones unitarias (Corrêa *et al*, 1993).

El proceso de curado de tabaco Virginia ya ha sido modelado por Cundiff *et al* (1981), Yang *et al* (1982 y 1983), Lambert *et al* (1982), Ryan *et al* (1988) y Kiranoudis *et al* (1990).

Hay también modelos para determinadas propiedades físicas del tabaco que complementan modelos de simulación de curado más complejos: *isotermas de sorción y desorción* de la humedad del tabaco en función de la humedad relativa del aire (Locklair *et al*, 1957; Crump, 1982; Kiranoudis *et al*, 1990); *tasa de liberación de CO₂* en función de la temperatura (Johnson *et al*, 1963); *pérdida de sólidos* en la lámina foliar (Maw *et al*, 1985); y *propiedades térmicas* (Chang *et al*, 1972; Kerekes *et al*, 1993a; Kerekes *et al*, 1993b).

Se puede citar también el modelo de Bridges *et al* (1981) para el curado de tabaco tipo *burley*. Es un modelo tridimensional de secado en capa espesa que se aplica a sistemas con ventilación natural y puede predecir, a lo largo del proceso, la temperatura y humedad relativa del aire a través de la masa del producto, y el contenido de humedad del tabaco.

El modelo de Cundiff *et al* (1981) utiliza balances analíticos de energía para predecir el consumo de energía por diferentes fuentes y la cantidad de humedad eliminada del tabaco, basándose en los cambios de las propiedades psicrométricas del aire de curado.

Yang *et al* (1982), basándose en el modelo de Cundiff *et al* (1981), desarrollaron un modelo que se aplica a la simulación de sistemas integrados de curado de tabaco del tipo secaderos multicámaras. Este modelo analiza los componentes relacionados con el suministro y demanda de energía: a. el aprovechamiento de la energía solar; b. la recuperación directa o indirecta de la energía del aire de curado; c. la energía producida por el tabaco; d. la energía del combustible y e. la energía eléctrica. El dimensionamiento del tamaño del intercambiador de calor y de la cámara de curado y la influencia de los mismos en el ahorro energético del sistema fueron también analizados por Yang *et al* (1983).

Lambert *et al* (1982) establecieron un modelo para ser empleado en los estudios de optimización de uso de la energía en el proceso de curado. Aplicaron la técnica de modelo estacionario lineal, lo que les permitió examinar, de manera independiente, la respuesta del sistema de curado a distintas entradas.

El modelo de Ryan *et al* (1988), también basado en Cundiff *et al* (1981), es un modelo energético que emplea relaciones de difusión de humedad desarrolladas por ellos, y es capaz de predecir: **a.** los valores de los componentes del balance energético del sistema de curado; **b.** la masa del tabaco; **c.** la temperatura del aire de curado; y **d.** las tasas de ventilación. Estas variables son estimadas a lo largo del proceso y de acuerdo con el programa de curado empleado.

Kiranoudis *et al* (1990) describe un modelo de secado en capa delgada para secaderos industriales de tabaco Virginia. Es un modelo de transferencia de masa donde se supone que la mayor resistencia a la transferencia de humedad se manifiesta en la capa límite de aire en contacto con la hoja y que la fuerza de arrastre es la diferencia de humedad relativa. El modelo también utiliza una ecuación empírica para predecir el contenido de humedad de equilibrio del tabaco como función de la temperatura y humedad relativa de la capa límite de aire alrededor de la hoja.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 Descripción del Secadero Experimental

El secadero estudiado fue construido en 1993 por INDUSTRIA AGROTEX, S.L. (Jaraiz de la Vera, Cáceres). El sistema está constituido por 2 bandejas yuxtapuestas con área útil de $1,43 \times 0,34 \text{ m}^2$ y una cámara de curado de $1,50 \times 0,82 \times 0,91 \text{ m}^3$ (Figuras 4.1 y 4.2).

En los ensayos de 1993 se utilizaron resistencias eléctricas para el calentamiento del aire de curado y en año 1994 se empleó la combustión de gas propano.

Las paredes del secadero, con un espesor de 35 mm, estaban constituidas por dos chapas galvanizadas lisas, teniendo entre sí una capa de poliuretano proyectado.

La cámara de curado tiene un piso perforado, por donde pasa el aire que irá curar y secar el tabaco. Bajo éste, está el plenum con volumen de $1,50 \times 0,82 \times 0,30 \text{ m}^3$. (Figura 4.3).

El secadero posee dos ventanillas para entrada y salida de aire. La ventanilla de entrada de aire tiene su apertura controlada automáticamente de acuerdo con la temperatura de bulbo húmedo, T_{bh} , que el programa de curado aplicado exige que se mantenga en la cámara.



Figura 4.1 - Secadero experimental sin las bandejas.



Figura 4.2 - Secadero experimental con una bandeja colocada.

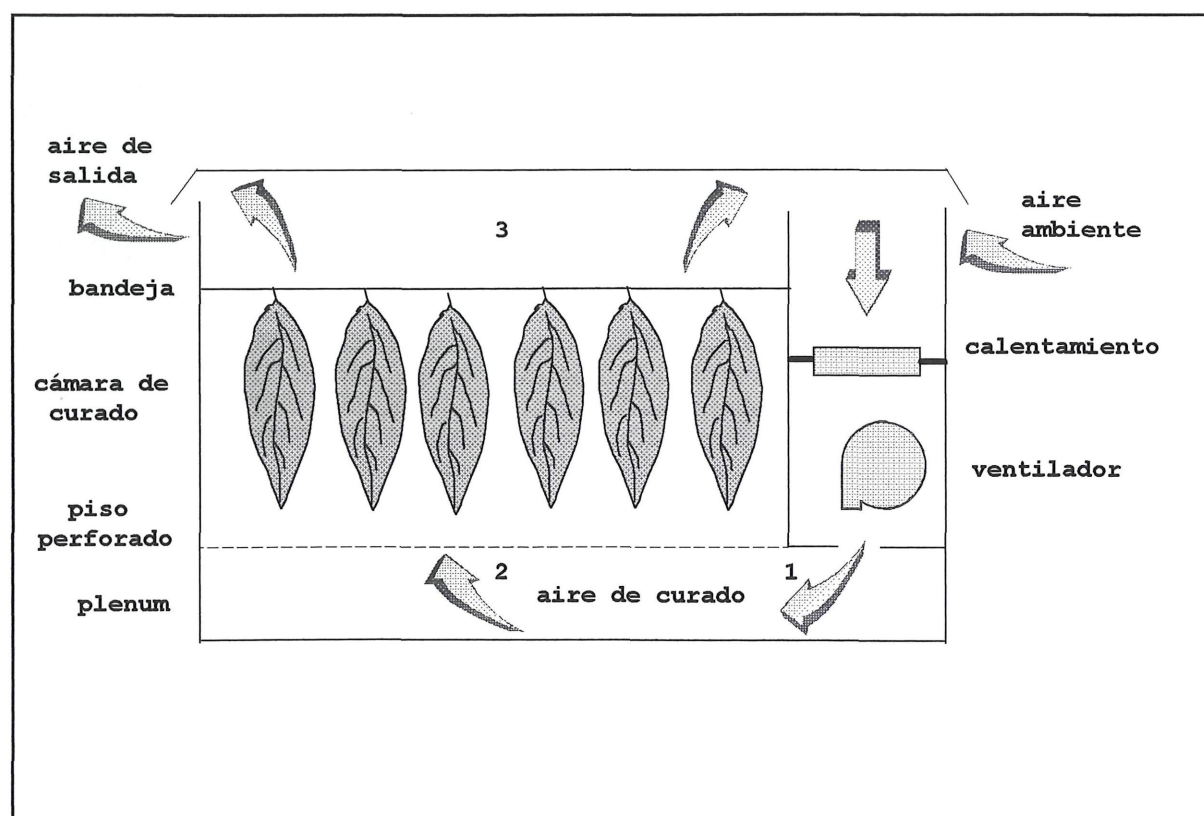


Figura 4.3 - Esquema del secadero experimental de dos bandejas.

Este sistema de control también actúa sobre la temperatura del aire de curado, T_{bs} , controlando las resistencias eléctricas o la combustión del gas en función de dicho programa (Figura 4.4).

La puerta del secadero, durante todos los ensayos, se cerraba herméticamente.



Figura 4.4 - Detalle del sistema de control automático del programa de curado, que actúa sobre T_{bs} y T_{bh} del aire de curado.

4.2 Local de los Ensayos

Los ensayos con el secadero experimental fueron desarrollados en la Finca Cuaternos, término municipal de Jaraiz de la Vera, provincia de Cáceres. Es una finca que tiene un contrato de venta de su tabaco con CETARSA además de un convenio con CETARSA I+D para utilizarla como campo de experimento en el área de curado de tabaco Virginia. Para tal fin, hace algunos años, se instaló allí un grupo de seis secaderos pequeños de 4 bandejas montados sobre una misma plataforma y que utilizan la combustión de gasóleo C para el calentamiento del aire de curado.

Se utilizó en todos los ensayos tabaco (*Nicotiana tabacum*) de la variedad genética K-326 de la propia finca. Las hojas curadas en los ensayos eran cosechadas siempre en una misma parcela.

Todos los ensayos se realizaron con el mismo programa de curado sin fijar la masa inicial de tabaco ni el caudal de aire de curado. Es decir, se operó el secadero experimental bajo las mismas condiciones de un secadero comercial y de acuerdo con la rutina normal de la finca, donde se llenan las bandejas hasta su capacidad máxima. La capacidad ésta es evaluada subjetivamente por el cultivador sobre la marcha de la recolección.

4.3 Ensayos Preliminares

El secadero experimental fue sometido a 8 ensayos previos con el objetivo de experimentar los métodos de medición que serían aplicados en el año siguiente. Las pruebas se desarrollaron del día 11 de agosto al 11 de noviembre de 1993.

El secadero fue montado encima de una báscula para la determinación de la variación de la masa del tabaco durante el proceso de curado.

En el interior de la cámara de curado, en su parte superior, fueron instalados 2 sensores tipo PT-100 para medición de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire de curado al salir de la masa de tabaco. En el plenum además de los 2 sensores tipo PT-100 para temperatura seca y húmeda, se instaló un sensor tipo anemómetro de hilo caliente SIERRA 660 AVS para la medición de la velocidad del aire de curado.

Los sensores que indicaban la temperatura de bulbo húmedo eran alimentados continuamente con agua desde la parte externa del secadero por intermedio de una mecha dentro de un tubo, empleando el sistema de vasos comunicantes. Los cinco sensores estaban conectados a un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) AHLBORN THERM 5500-3. Los datos almacenados en el SAD se recuperaban en un ordenador portátil que se comunicaba por la puerta serial RS-232C controlados por el programa comercial THERM.

La energía eléctrica consumida por el ventilador y por las resistencias eléctricas en el calentamiento del aire de curado fue medida por el Analizador de Magnitudes Eléctricas (AME) VIP SYSTEM-3, que registraba los datos en una tarjeta de memoria no volátil. Posteriormente los datos eran volcados en un ordenador portátil mediante una interface que recibía la tarjeta de memoria. La comunicación entre ordenador e interface era ejecutada por la puerta paralela y controlada por el programa comercial VIPU20.

Los ensayos previos comprendieron los siguientes pasos:

- a. Pesar el secadero experimental cada seis horas.
- b. registrar en el SAD cada 15 minutos:
 - b.1 temperatura de bulbo seco (Tbs) del aire de curado antes y después de pasar por la masa de tabaco;
 - b.2 temperatura de bulbo húmedo (Tbh) del aire de curado antes y después de pasar por la masa de tabaco;
 - b.3 velocidad del aire de curado en el plenum;
- c. registrar en el AME cada 15 minutos el consumo de energía eléctrica del secadero en kWh.

Los datos de pesada del secadero, restando la tara del sistema (medida antes de cada ensayo) fueron empleados para obtener la curva de pérdida de masa del tabaco en función del tiempo de curado y bajo las condiciones ambientales del Valle del Tiétar. La presión atmosférica de referencia fue el promedio de los valores diarios medidos en la estación de Talayuela durante los ensayos.

Para determinar la humedad relativa (Hr) del aire de curado antes y después de pasar por la masa de tabaco, puntos 2 y 3 de la Figura 4.3, se desarrolló un programa en lenguaje Turbo Pascal, basándose en la metodología del programa GRAPSI (Melo *et al*, 1993). A partir de los datos Tbs, Tbh y Hr del aire de curado se construyeron las curvas de curado en función del tiempo de curado y bajo las condiciones ambientales del Valle del Tiétar.

Conociéndose la sección transversal del plenum del secadero ($0,78 \times 0,26 \text{ m}^2$) en el punto 1 de la Figura 4.3, donde se instaló el sensor anemómetro para medir la velocidad del aire de curado, se obtuvo el caudal respectivo, según la fórmula recomendada por el fabricante del sensor (Sierra Instruments, 1990):

$$v_{cor} = 3,4004 \frac{v_{med}}{P_{atm}} (t + 273,16) \quad (4.1)$$

en que:

v_{cor} : valor corregido de la velocidad del aire de curado, $m.s^{-1}$;

v_{med} : velocidad media del aire en la sección de medición, $m.s^{-1}$;

P_{atm} : presión atmosférica en el local de medición, mbar;

t : temperatura del aire de curado en el punto de medición, °C.

A partir de los resultados de la ecuación 4.1 se hizo, para cada ensayo, la curva del caudal de aire de curado en función del tiempo de curado y de las condiciones ambientales del Valle del Tiétar.

Como los ficheros generados por el programa THERM, a partir de los datos almacenados en el SAD, presentaban un formato que dificultaba la visualización de las mediciones en función del tiempo, se desarrolló el programa TRANSFOR en lenguaje Turbo Pascal para solucionar dicho problema. TRANSFOR generaba otro fichero con la disposición adecuada de los datos para su utilización por una planilla electrónica.

4.4 Ensayos de la Campaña de 1994

La metodología aplicada en el análisis del curado del tabaco, bajo las condiciones del Valle del Tiétar, utilizando el secadero experimental de 2 bandejas, durante la Campaña de 1994 fue básicamente la misma del año anterior, con algunas modificaciones. Fueron realizados 8 ensayos en este año que empezaron el día 02 de agosto y terminaron el día 11 de octubre.

El secadero experimental, en función de los resultados de la campaña del año anterior, sufrió las siguientes modificaciones:

- a. Disminución del tamaño de las ventanillas de entrada y salida de aire.
- b. Reducción de la velocidad de operación del ventilador para disminuir el caudal de aire admitido en la cámara de curado.
- c. Sustitución de los sensores de temperatura PT-100 con mecha húmeda por sensores tipo capacitivos para humedad relativa GEONICA MP-100.
- d. Utilización de sistema de combustión de gas propano para calentar el aire de curado.

Mientras los trabajadores, en la parcela seleccionada para los ensayos, cogían manualmente las hojas de tabaco e iban llenando las bandejas del secadero se sacaba una muestra

de 5 hojas elegidas al azar. Estas hojas eran llevadas inmediatamente al laboratorio para determinación de su contenido de humedad según la norma ISO 6488 (1981).

Después de llenadas las dos bandejas, las mismas eran transportadas al secadero experimental, que inmediatamente se ponía en marcha aplicando el siguiente programa de curado según las recomendaciones técnicas de CETARSA I+D:

- a.** Subir 1 °C/h hasta $T_{bs}=38$ y $T_{bh}=37$. Mantener trampillas cerradas.
- b.** Revisión a las 48 horas...
 - b.1** si todo el tabaco está de color amarillo, se sube la temperatura 0,5 °C/h hasta $T_{bs}=45$ y $T_{bh}=38$;
 - b.2** si el tabaco aún está algo verde, subir la temperatura 0,5 °C/h hasta $T_{bs}=41$ y $T_{bh}=38$ y así se mantiene de 6 a 8 horas. Volver al paso b.1
- c.** Cuando se esté empezando a secar el piso de abajo del secadero, se sube la temperatura 1,0 °C/h hasta $T_{bs}=54$ y $T_{bh}=38$.
- d.** Cuando la lámina del segundo piso del secadero esté totalmente seca se sube la temperatura 1,0 °C/h hasta $T_{bs}=71$ y $T_{bh}=43$.

Las decisiones para cambiar de etapa dentro del programa de curado se basaban en la evaluación de los cambios en las características físicas del tabaco (color y textura) dentro de cada etapa, según las recomendaciones de CETARSA I+D (Pérez Carbonell, 1987)

El secadero fue montado encima de una báscula para la determinación de la variación de la masa del tabaco durante el proceso de curado. Las pesadas era tomadas cada seis horas durante los ensayos.

En el interior del secadero fueron instalados los siguientes sensores para las mediciones que se desarrollaron a lo largo de los ensayos:

- a. dos sensores tipo PT-100 para medir la temperatura del aire de curado antes y después de pasar por la masa de tabaco (puntos 2 y 3, Figura 4.3);
- b. dos sensores tipo capacitivo GEONICA MP-100 para la determinación de la humedad relativa del aire de curado antes y después de pasar por las bandejas con hojas de tabaco, ubicados en los puntos 2 y 3 (Figura 4.3);
- c. un sensor tipo anemómetro de hilo caliente SIERRA 660 AVS para la medición de la velocidad media del aire de curado en la sección del punto 1 (Figura 4.3). El caudal respectivo fue calculado con la Ecuación 4.1.

Los sensores estaban conectados al SAD, utilizado en la Campaña 1993, que registraba y almacenaba los valores instantáneos cada 15 minutos durante el proceso de curado analizado en cada ensayo.

La energía eléctrica consumida por el ventilador durante los ensayos fue registrada por equipo AME, también utilizado en la Campaña 1993.

Los programas de comunicación entre el SAD y el AME con el ordenador portátil fueron los mismos de la campaña anterior, es decir, el THERM y el VIPU20, respectivamente.

Las condiciones del aire ambiente, bajo las cuales se realizaron los ensayos, es decir, temperatura y humedad relativa, fueron aquellas registradas por la estación meteorológica ubicada en la Finca la Cañalera (Talayuela), donde están las instalaciones de CETARSA I+D. Estos datos fueron utilizados para determinar la curva de temperatura y humedad relativa de un día típico de cada mes en que se desarrollaron los tests. Este día típico representa las condiciones medias del mes estudiado, donde la curva representativa de los valores de la temperatura y la humedad relativa en función de la hora fue determinada por un análisis de regresión tipo Fourier (Vianello *et al*, 1983). La forma de la curva es:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (4.2)$$

Para la medición del consumo de propano en los ensayos se montó la bombona de propano que alimentaba el sistema de calentamiento del aire de curado encima de una báscula y se hicieron pesadas cada seis horas; así se obtuvo la curva de consumo de combustible en función del tiempo de curado y bajo las condiciones ambientales del valle del Tiétar.

Al final de los ensayos, cuando las hojas ya estaban listas para su almacenamiento, se sacaba una muestra para realizar análisis químicos para la determinación del porcentaje de cloruros, azúcares y de alcaloides. Estas determinaciones fueron realizadas por los laboratorios de la fábrica de procesamiento de tabaco de CETARSA en Talayuela (Cáceres). Al mismo tiempo, se sacaba una muestra testigo de una hornada del mismo piso de un secadero del cultivador que tuvo su inicio de curado en el mismo día del secadero experimental.

Durante las pruebas del secadero experimental también se analizó la marcha del programa de curado de los seis secaderos de 4 bandejas, ubicados en la misma finca, con el propósito de comparar los dos tipos de sistemas de ensayos de curado. Los seis secaderos estaban conectados a un ordenador tipo IBM PC/AT compatible que les controlaba el programa de curado y les registraba la temperatura y humedad relativa del aire de curado cada 15 minutos, según el *software* BRAGADO, desarrollado por Industrias Bragado, S.A. (Jaraiz de la Vera). Para utilizar los datos registrados por el programa BRAGADO con el fin de trazar las curvas del programa de curado fue necesario desarrollar el programa CETARSA6. Para calcular la temperatura de bulbo húmedo del aire de curado en función de su temperatura y humedad relativa se hizo el programa CALC_TBH, según la metodología de cálculo desarrollada en el *software* GRAPSI (Melo *et al*, 1993). Toda la metodología aplicada en la Campaña del 94 está resumida en el esquema de la Figura 4.5 .

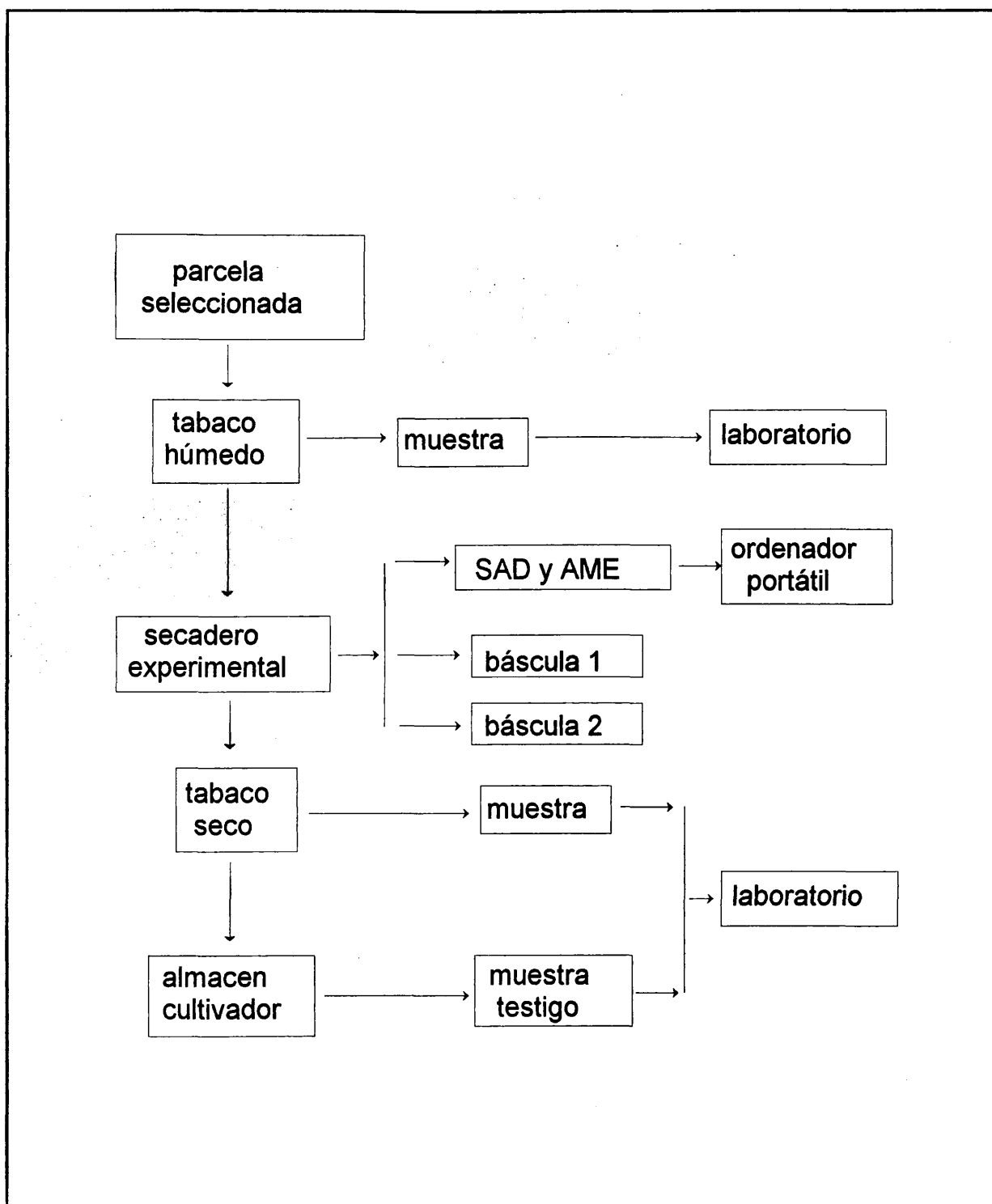


Figura 4.5 - Esquema de la metodología aplicada en la Campaña del Tabaco de 1994

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de la Campaña de 1993

Se realizaron 8 ensayos con el secadero experimental con el objetivo de comprobar su funcionamiento respecto a un secadero comercial. Una serie de problemas se pusieron de manifiesto a lo largo de estos ensayos:

- a. El sistema de humedecimiento de la mecha, que cubría el sensor para determinación de la temperatura húmeda, se mostró inadecuado porque hubo instantes, durante las fases de secado de hoja y secado de vena, en que las lecturas de T_{bh} eran iguales a las de T_b , indicando que la mecha estaba seca. Por lo tanto, el sistema fue descartado y las mediciones de T_{bh} desconsideradas.
- b. El sistema de calentamiento del aire de curado por resistencias eléctricas se mostró insuficiente para alcanzar y mantener la temperatura necesaria para el secado de vena, en la última fase del curado. Por ello, fue sustituido por un sistema de calentamiento de combustión de gas propano. Las dos últimas pruebas se realizaron con el nuevo sistema que solucionó los problemas citados.
- c. En dos de los ensayos los valores máximos de caudal de aire de curado por kg de tabaco fresco fueron mayores que los valores máximos medidos en los secaderos experimentales

de 4 bandejas, ubicados en la misma finca; y también superiores a los valores citados en los manuales de secaderos comerciales utilizados en la región objeto del estudio. Por ello, se procedió a la reducción de la velocidad del ventilador. Los datos comparativos de caudal de aire por kg de tabaco fresco están reflejados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 - Caudales de aire de curado por kg de tabaco fresco en los secaderos experimentales de 2 y 4 bandejas y un secadero comercial de tabaco.

SECADERO	CAUDAL DE AIRE $m^3.h^{-1}.kg^{-1}$ tabaco fresco
2 bandejas	3,38 - 5,72
4 bandejas	4,30 - 5,30
Loyfer 72 bandejas ^(*)	3,70 - 4,80

(*) Datos según el manual del fabricante.

- d. Hubo problemas para mantener alta la humedad relativa durante el amarilleo en el interior de la cámara de curado. Se perdía humedad por las trampillas, impidiendo mantener la Hr por encima del 90%. Para solucionar este problema se redujo el tamaño de las trampillas.

Los resultados medios que se obtuvieron durante la Campaña 1993 están descritos en la Tabla 5.2, representando el promedio de cuatro ensayos válidos de los ocho que se realizaron. En función del alto coeficiente de variación de la masa final del tabaco, se hizo otra calibración de la báscula al término de la Campaña. El consumo de energía eléctrica total del sistema de curado por kg de tabaco curado fue 33,4% superior a la cifra citada por De la Plaza (1988) del 9,28 kWh.kg⁻¹ tabaco curado. El caudal de aire por kg de tabaco fresco estuvo dentro del rango

de caudales con que operan los secaderos experimentales de 4 bandejas y de un secadero comercial de 72 bandejas.

Tabla 5.2 - Promedio de los resultados preliminares referentes a 4 ensayos realizados con el secadero experimental durante la campaña del tabaco de 1993 (11/08 al 11/11/93).

VARIABLE MEDIDA		Media	Desviación Típica	Coefficiente de Variación %
Tabaco	Masa Inicial, <i>kg</i>	108,80	15,43	14,18
	Masa Final, <i>kg</i>	19,80	6,08	30,70
Consumo de Energía	<i>kWh</i>	210,83	9,97	4,73
	<i>kWh.kg⁻¹ tabaco curado</i>	12,38	2,27	18,31
Caudal de Aire	<i>m³.h⁻¹</i>	543,54	16,36	3,01
	<i>m³.h⁻¹.kg⁻¹ tabaco fresco</i>	4,35	0,82	18,91
Tiempo de Curado, <i>h</i>		138,38	21,62	15,62

5.2 Resultados de la Campaña de 1994

Las fechas en que se realizaron las pruebas con el secadero experimental están señaladas en la Tabla 5.3 donde se indican el piso foliar de la planta de tabaco que fue recogido y el tiempo de duración del proceso de curado de la hornada.

Tabla 5.3 - Fechas de los ensayos de la Campaña de 1994 con la indicación del piso foliar recogido y el tiempo de curado.

Ensayo	Fecha	Piso Foliar	Tiempo de Curado h
1	02/08 al 07/08/94	P	134,36
2	09/08 al 15/08/94	P	151,52
3	19/08 al 25/08/94	C	152,00
4	26/08 al 02/09/94	X	155,65
5	05/09 al 12/09/94	X	167,70
6	13/09 al 19/09/94	C	151,08
7	27/09 al 04/10/94	B	157,37
8	05/10 al 11/10/94	T	133,58
Media			150,41
Desviación Típica			10,72
Coeficiente de Variación			7,1%

5.2.1 Curva de Secado

Las *curvas de secado* del tabaco de la variedad Virginia K-326, obtenidas bajo las condiciones del valle del Tiétar y el programa de curado de CETARSA I+D, están descritas en los gráficos de la Figura 5.1. En la Tabla 5.4 están los promedios referentes a masa inicial y masa final, el contenido de humedad inicial, y la tasa de curado del tabaco. Las comparaciones entre las medias de los ensayos fueron hechas según el test de Duncan, con un nivel de significación del 5%.

Tabla 5.4 - Promedio de los resultados referentes a masa inicial, masa final, y contenido de humedad del tabaco obtenidos en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la Campaña del Tabaco de 1994.

Ensayo	Tabaco			
	Masa Inicial kg	Masa Final kg	Humedad Inicial (*) % bh	Tasa de Curado (*) kg.h ⁻¹
1	98	3	87,54 a	0,7351 ab
2	135	9	83,41 ab	0,8284 ab
3	122	9	82,40 abc	0,7501 ab
4	150	8	81,00 bcd	0,9138 a
5	139	14	77,48 cd	0,7425 ab
6	133	14	76,57 d	0,8192 ab
7	115	14	70,98 e	0,6539 b
8	111	13	69,69 e	0,7233 ab
media	125,4	10,5	78,63	0,7709
s	15,88	3,71	5,77	0,93
cv	12,7%	35,3%	7,3%	50,1%

(*) Los valores identificados con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí al nivel de significación de 5% según el test de Duncan.

El alto coeficiente de variación de la masa final del tabaco reflejado en la Tabla 5.3 se le puede explicar en función de la no uniformidad, entre los ensayos, de los valores de masa inicial (que influye en la densidad de llenado de la cámara) y del contenido inicial de humedad del tabaco.

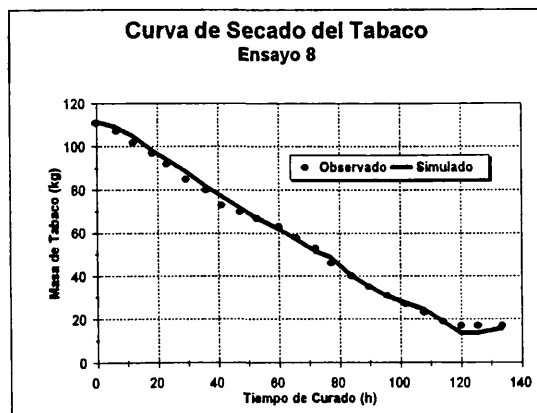
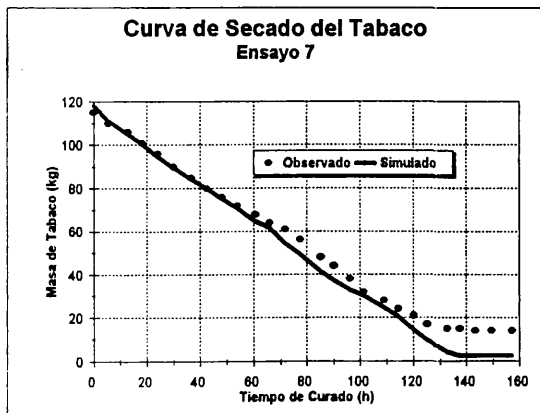
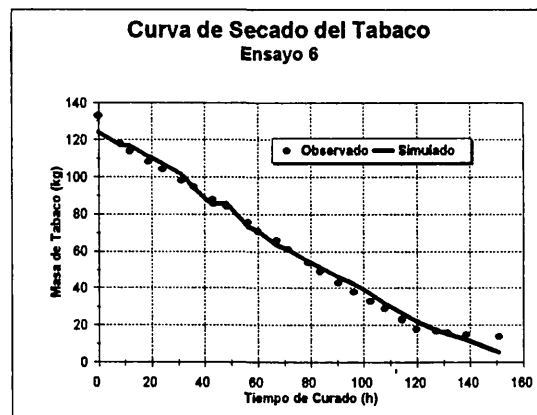
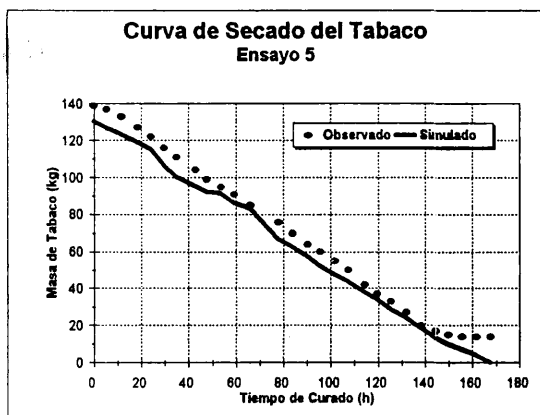
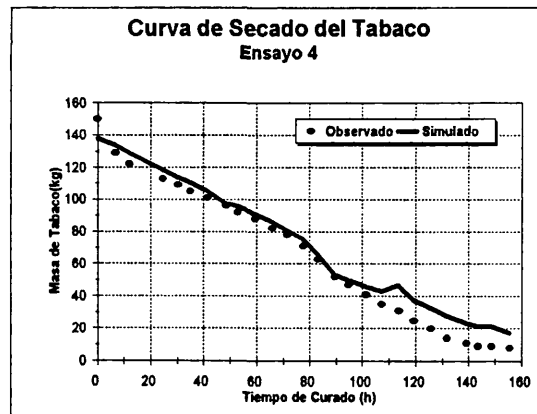
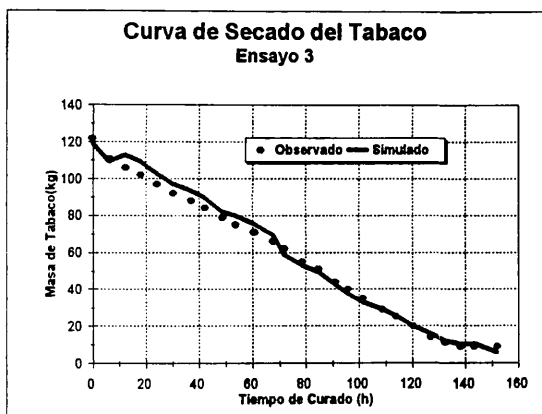
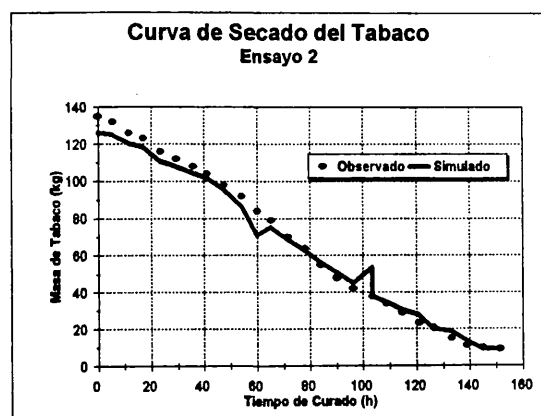
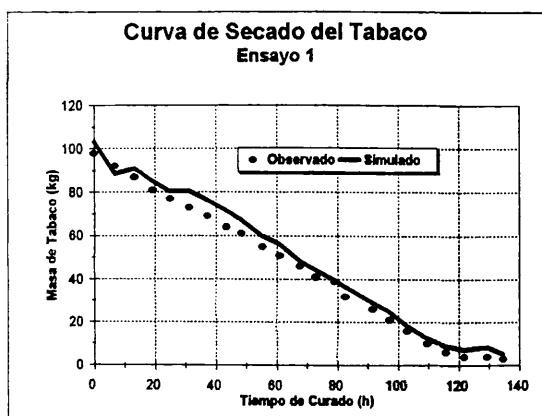


Figura 5.1 - Curvas de Secado del Tabaco, Campaña 1994.

El contenido de humedad del tabaco fresco, en el instante de la recolección, disminuyó a lo largo de la Campaña, porque el tabaco que se va quedando en el campo está sometido a un proceso lento de secado con aire ambiente.

La tasa de curado no presentó diferencias significativas al nivel de significación del 5% entre los ensayos, excepto entre los ensayos 4 y 7.

Aplicándose el método de regresión lineal múltiple a los datos de masa de tabaco, obtenidos experimentalmente, se obtuvo el siguiente modelo para la curva de secado del tabaco con R^2 ajustado igual a 0,976:

$$m_T = 0,649994 + 0,451631.q + 0,444297.hr - 0,0244901.T_{bs} - 0,571223.t + 0,635402.m_0 \quad (5.1)$$

en que:

m_T : masa de tabaco en el instante t , kg;

q : caudal de aire de curado en el plenum, $m^3.h^{-1}.kg^{-1}$ tabaco;

hr : humedad relativa del aire de curado en el plenum, %;

T_{bs} : temperatura del aire de curado en el plenum, °C;

t : tiempo de curado, h;

m_0 : masa inicial del tabaco, kg.

La matriz de correlaciones de las variables del modelo propuesto para m_T , según el método de Pearson aparece en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 - Matriz de correlaciones de las variables del modelo de regresión múltiple m_T , según el método de Pearson.

	m_T	m_0	t	T_{bs}	hr	q
m_T	1,00000	0,17252	-0,94752	-0,90827	0,95632	-0,74091
m_0		1,00000	0,09203	0,01191	-0,01724	-0,23520
t			1,00000	0,93275	-0,96619	0,73253
T_{bs}				1,00000	-0,93556	0,77694
hr					1,00000	-0,72886
q						1,00000

5.2.2 Programa de Curado

En los gráficos de *programa de curado* (Figura 5.2) están indicados, en función del tiempo, los valores de Tbs y Hr del aire medidos en el plenum del secadero experimental (punto 2 en la Figura 4.3). Los valores de Tbh, que también están indicados, fueron calculados según la metodología del programa informático GRAPSI (Melo *et al*, 1993). Cada valor sobre el gráfico representa el promedio de 4 medidas tomadas cada 15 minutos por el SAD. Mediante este gráfico se visualiza como se mantuvieron dichas variables en cada fase del curado en función del programa de curado aplicado al secadero por el cultivador.

La Figura 5.3 representa el mismo programa de curado aplicado a uno de los secaderos pequeños de 4 bandejas. Este gráfico contiene los valores medios de 4 pruebas realizadas con el secadero n° 6 de 4 bandejas, siendo cada punto la media de 4 valores registrados cada 15 minutos.

Comparando los dos sistemas de curado, se puede verificar que el secadero de 4 bandejas presentó valores de Hr del aire por encima del 90% durante el amarilleo, mientras que en el secadero estudiado, la Hr en la cámara de curado se mantuvo entre el 80-90%, excepto en el ensayo 1, donde su valor estuvo por debajo del 80%. Esto puede significar que el secadero es pequeño para la cantidad de aire circulante en su interior, es decir, que cuando se abren las trampillas se pierden cantidades significativas de aire húmedo, lo que impide mantener la Hr en los niveles exigidos por el programa de curado durante el amarilleo. Además se percibe que la Hr baja siempre según una pendiente y no por escalones, como acontece en el secadero de 4 bandejas, que es lo que exige el programa de curado de CETARSA I+D.

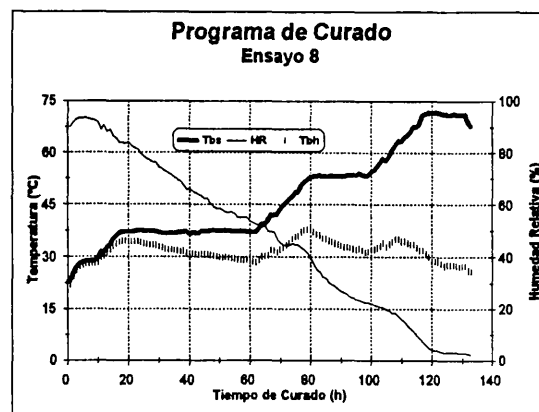
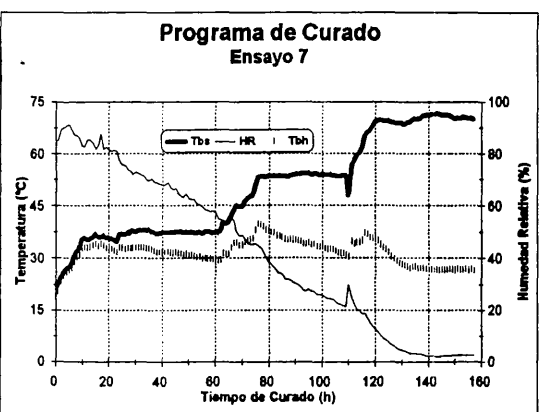
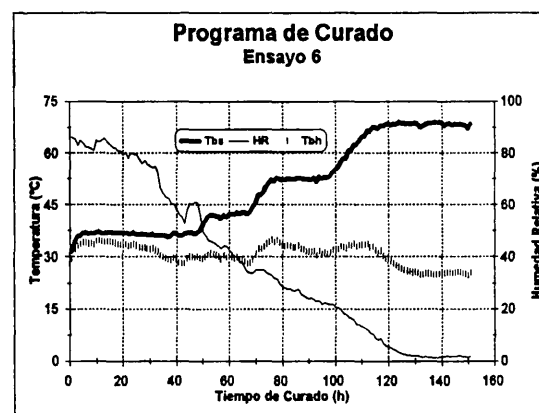
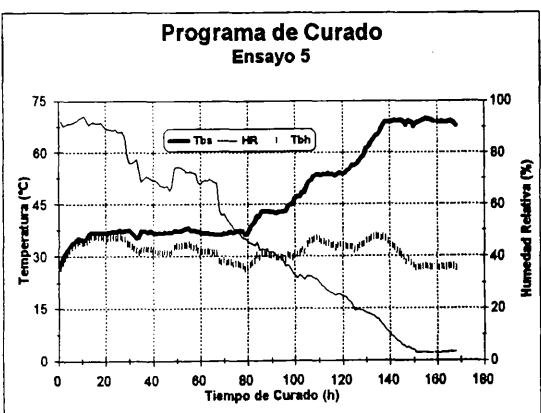
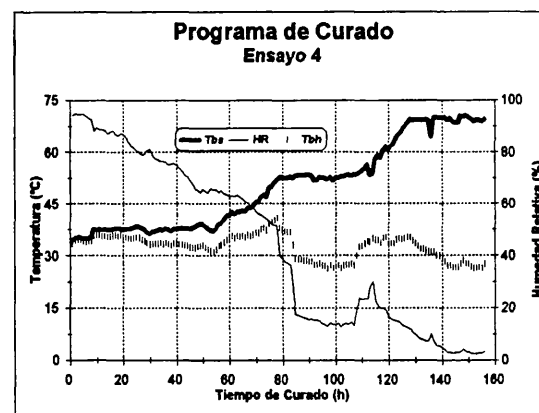
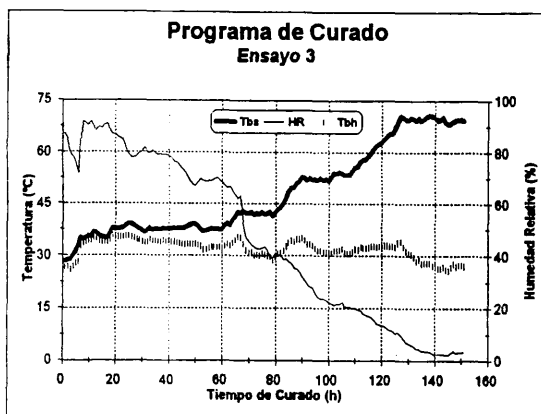
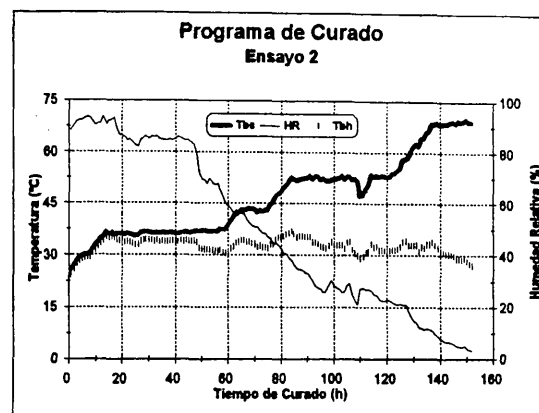
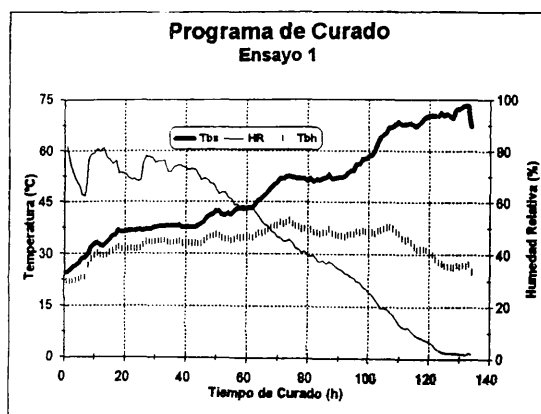


Figura 5.2 - Programa de Curado, Campaña 1994.

Respecto al control de la Tbs se puede decir que sus valores se mantuvieron dentro del rango aceptable de acuerdo con el programa de curado aplicado. Lo mismo no ocurrió con la Tbh, debido a los problemas que sucedieron con la Hr en el interior de la cámara de curado.

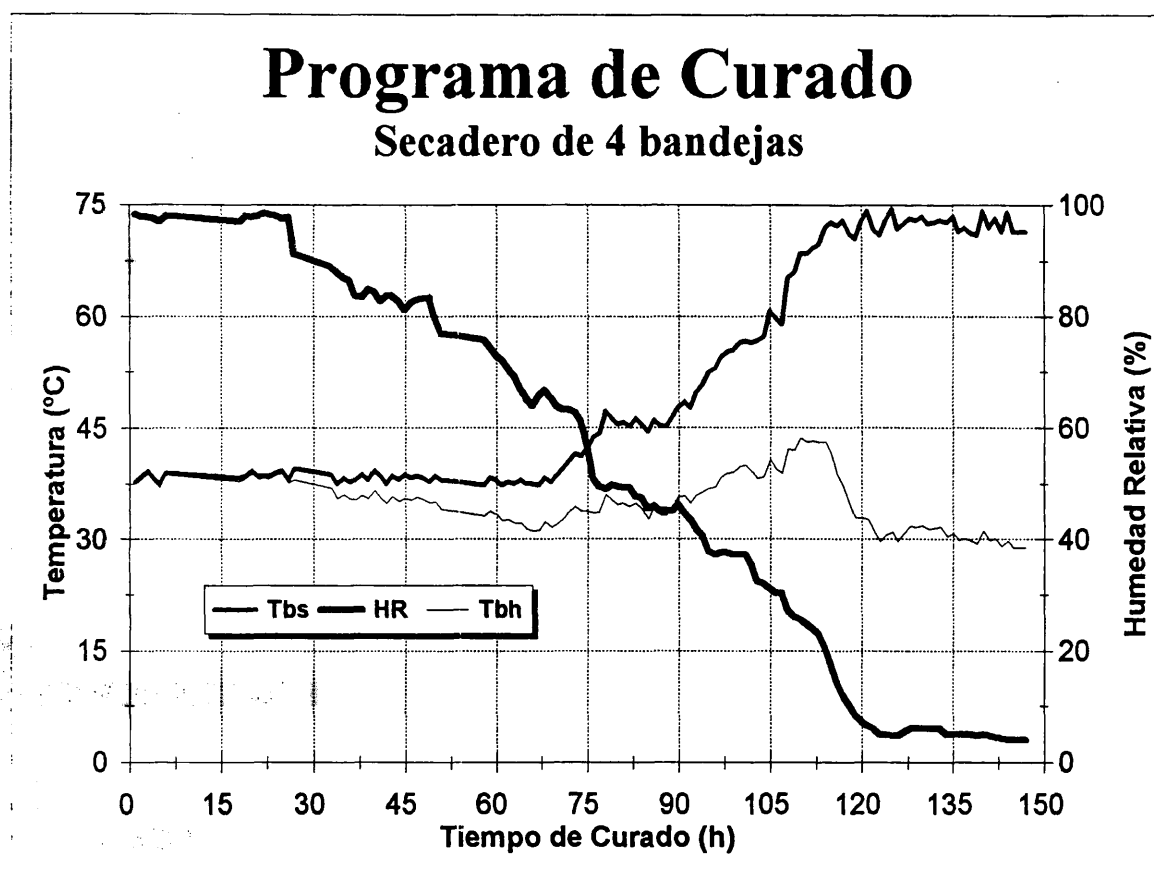


Figura 5.3 - Programa de curado del secadero de 4 bandejas durante la campaña del tabaco de 1994, donde cada punto se refiere al promedio de 4 ensayos.

5.2.3 Caudal de Aire de Curado

De acuerdo con la marcha de los parámetros Tbs y Hr a lo largo de cada ensayo y bajo las condiciones del valle del Tiétar, se obtuvo una curva con las mediciones del caudal del aire de curado en el punto 1 del plenum del secadero, con el sensor de hilo caliente, según la Figura 4.3. Esta curva está representada en la Figura 5.4, donde cada punto de los gráficos representados es el promedio de 4 medidas registradas por el SAD.

La Tabla 5.6 contiene los resultados medios de caudal de aire de curado por ensayo. Las medias fueron comparadas por el Test de Duncan con un nivel de significación del 5%. El promedio más alto ocurrió en los ensayos 3,5 y 7, y el más bajo, en el ensayo 2. El caudal de aire por kg de tabaco fresco está de acuerdo con el secadero experimental de 4 bandejas y con los valores de un secadero comercial (Tabla 5.1), aunque todos son superiores al valor recomendado por Suggs *et al* (1985) que es de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ tabaco fresco.

Las curvas del aire de curado presentaron formas distintas a lo largo del proceso en cada ensayo debido a que hubo diferencias en: **a.** la masa inicial y contenido de humedad inicial del tabaco, **b.** el piso recogido de la planta y **c.** la densidad de llenado de la cámara. El caudal medio de aire de curado con que se trabajó durante los ensayos en el secadero experimental fue de $413,64 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, que corresponde a $3,36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ tabaco fresco.

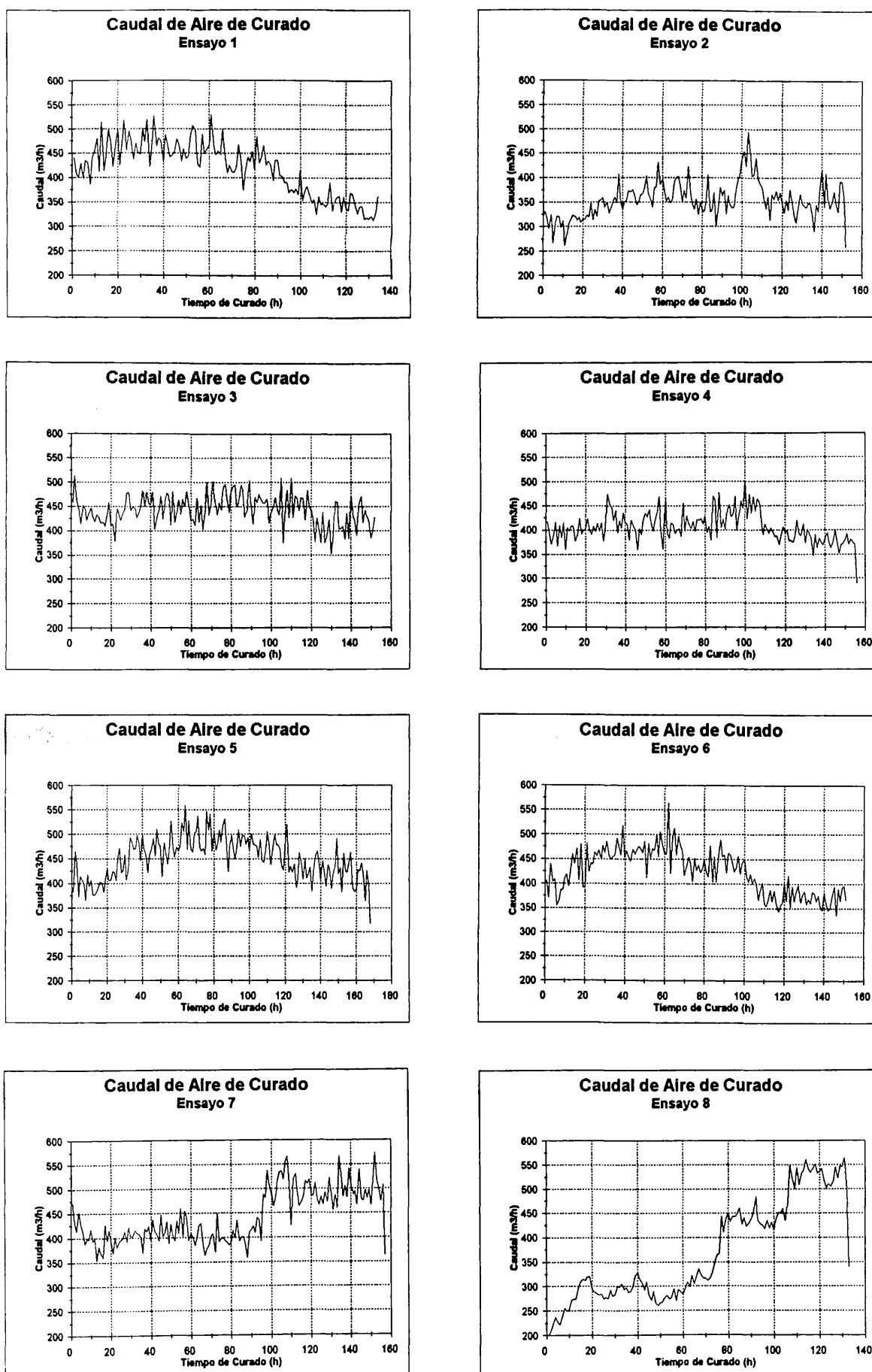


Figura 5.4 - Caudal de aire de curado, Campaña 1994.

Tabla 5.6 - Promedio de los resultados referentes a caudal de aire de curado obtenidos en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la Campaña del Tabaco de 1994.

Ensayo	Caudal de Aire de Curado	
	$m^3.h^{-1} (*)$	$litro . litro^{-1} . kg$ tabaco fresco
1	419,94 b	4,29
2	354,60 e	2,63
3	442,61 a	3,63
4	406,52 c	2,71
5	450,83 a	3,24
6	423,68 b	3,19
7	442,20 a	3,85
8	368,75 d	3,32
media	413,64	3,36
s	33,03	0,82
cv	8,0%	19,9%

(*) Los valores identificados con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí al nivel de significación del 5% según el test de Duncan.

5.2.4. Consumo de Energía

El consumo de energía observado durante los ensayos en el secadero experimental, incluyendo el consumo de gas propano y el consumo de energía eléctrica del ventilador, aparecen en la Tabla 5.7. Estos datos fueron obtenidos bajo las condiciones del valle del Tiétar, aplicándose el programa de curado CETARSA I+D.

Tabla 5.7 - Promedio de los resultados referentes a consumo de energía observados en los ensayos realizados con el secadero experimental durante la Campaña del Tabaco de 1994.

Ensayo	Consumo de Energía				
	Gas Propano ⁽¹⁾				Energía Eléctrica
	kg ⁽²⁾	kg.kg ⁻¹ tab.curado	MJ ⁽²⁾	MJ.kg ⁻¹ tab.curado	kWh
1	13,5 c	4,5	675 c	225	37,316
2	17,3 bc	1,9	865 bc	95	40,503
3	15,9 c	1,8	780 c	90	39,429
4	22,4 ab	2,8	1.120 ab	140	40,975
5	18,7 abc	1,3	935 abc	65	44,590
6	22,1 a	1,6	1.105 a	80	40,728
7	21,2 abc	1,5	1.060 abc	75	41,996
8	13,6 c	1,0	680 c	50	35,648
media	18,1	2,1	902,5	102,5	40,148
s	3,38	1,04	181,99	56,12	2,58
cv	18,7%	50,6%	20,2%	54,7%	6,4%

⁽¹⁾ Poder calorífico superior = 50.012 kJ.kg⁻¹ (Francis, 1969).

⁽²⁾ Los valores identificados con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí al nivel de significación del 5% según el test de Duncan.

Las medias de masa total de propano consumida y la energía suministrada por el combustible en cada ensayo fueron comparadas entre sí según el test de Duncan con un nivel de significación del 5%. El mayor consumo de propano sucedió en los ensayos 4,6 y 7 y el menor consumo en los ensayos 1,3 y 8.

Los gráficos de la Figura 5.5 representan el consumo de gas propano, puntual y acumulado, a lo largo del proceso de curado en cada ensayo.

El promedio del consumo de propano, $2,1 \text{ kg.kg}^{-1}$ de tabaco curado, estuvo por encima del valor citado por Suggs *et al* (1992), $0,61 \text{ kg.kg}^{-1}$ de tabaco curado, que es también un valor citado por otros investigadores para cálculos de consumo energético de secaderos de tabaco en EE.UU..

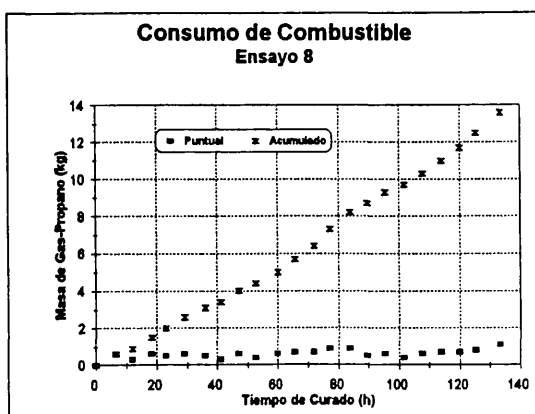
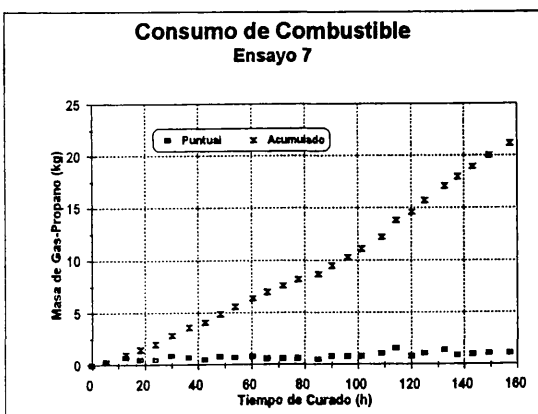
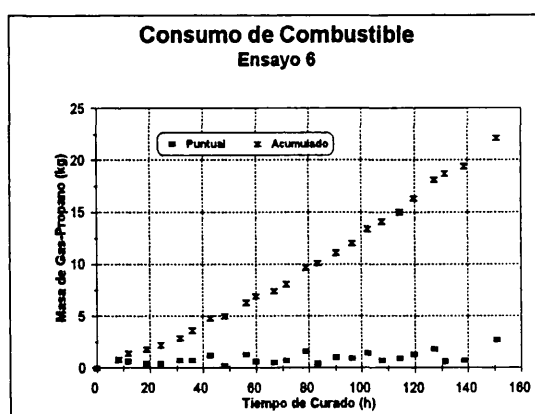
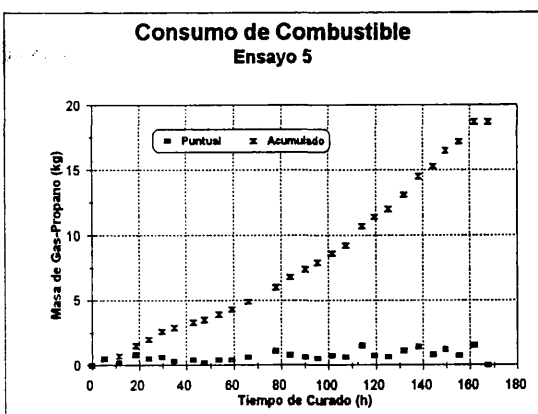
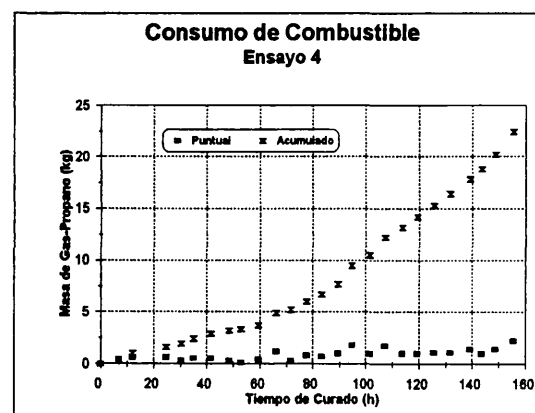
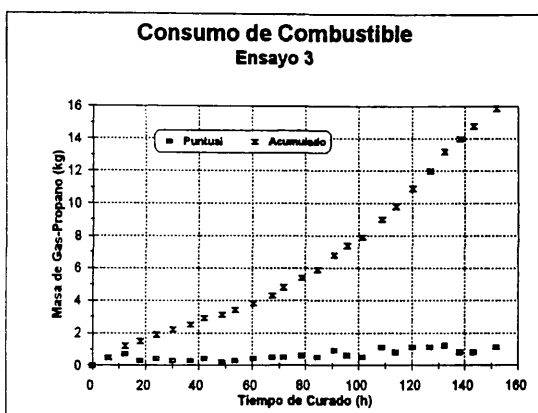
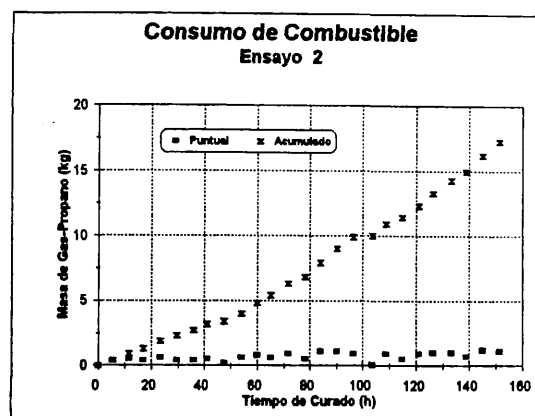
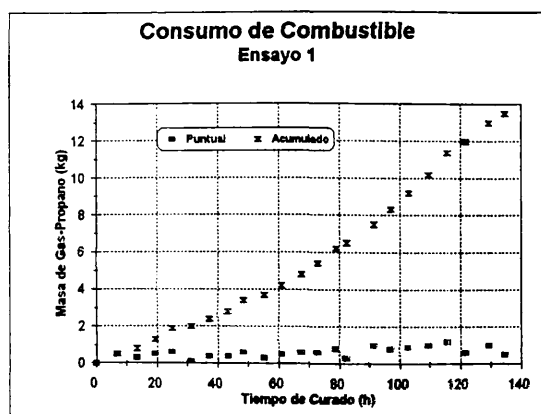


Figura 5.5 -Consumo de combustible (gas propano), Campaña 1994.

5.2.5 Análisis Químicos

Los resultados de los análisis químicos hechos por los laboratorios de CETARSA I+D están reflejados en la Tabla 5.8. Los análisis se refieren a la muestra sacada al final de cada ensayo realizado con el secadero experimental y a la muestra testigo, sacada en el mismo día del secadero del cultivador en la misma finca.

Tabla 5.8 - Resultados de los análisis químicos realizados en las muestras sacadas del secadero experimental y del secadero del cultivador (testigo), durante los ensayos desarrollados en la Campaña del Tabaco de 1994.

Ensayo	Análisis Químicos ⁽¹⁾			
	Azúcares Reductores %	Alcaloides Totales %	Relación Azúcares / Alcaloides	Cloruros %
1 testigo	4,7 NB 5,1 NB	1,47 NB 1,58 NO	3,20 NO 3,23 NO	0,11 NB 0,10 NB
2 testigo	5,4 NB 7,4 NO	1,25 NB 1,34 NB	4,22 NO 5,52 NO	0,08 NB 0,11 NB
3 testigo	12,0 NO 11,6 NO	1,48 NB 2,95 NO	8,11 NO 3,93 NO	0,08 NB 0,12 NB
4 testigo	10,5 NO 14,2 NO	1,39 NB 1,22 NB	7,55 NO 11,64 NA	0,08 NB 0,23 NB
5 testigo	12,8 NO 10,8 NO	1,58 NO 1,56 NO	8,10 NO 6,92 NO	0,09 NB 0,54 NO
6 testigo	14,3 NO 12,0 NO	1,49 NB 1,65 NO	9,60 NO 7,27 NO	0,06 NB 0,11 NB
7 testigo	21,3 NA 15,5 NO	1,62 NO 1,76 NO	13,15 NA 8,81 NO	0,09 NB 0,32 NO
8 testigo	22,3 NA 10,0 NO	2,18 NO 2,69 NO	10,23 NA 3,73 NO	0,31 NO 0,51 NO
media⁽²⁾ testigo	a 12,91 NO a 10,82 NO	a 1,56 NO a 1,84 NO	a 8,02 NO a 6,38 NO	a 0,11 NB a 0,25 NB
Intervalo Óptimo⁽³⁾	6 - 18	1,5 - 3,5	2 - 10	0,3 - 0,8

⁽¹⁾ NB: nivel bajo, NO: nivel óptimo, NA: nivel alto.

⁽²⁾ Los promedios identificados con la misma letra, entre muestra y testigo, no presentan diferencias significativas entre sí al nivel de significación del 5% según el test de Duncan.

⁽³⁾ Según la Dirección de Compras de CETARSA I+D (1992);

Según el test de Duncan, bajo un nivel de significación del 5%, los promedios de los análisis químicos del tabaco curado por el secadero experimental no presentó diferencias significativas respecto al tabaco curado en el secadero del cultivador. Además de no presentar diferencias significativas en los otros parámetros analizados, los promedios estuvieron dentro del rango de nivel considerado como óptimo por CETARSA I+D (1992), excepto en el porcentaje de cloruros. En este parámetro tanto las muestras del secadero testigo como las muestras del secadero experimental estuvieron por debajo de los valores óptimos.

5.3 Modelo para el *Día Típico* Durante la Campaña del Tabaco de 1994

Aplicandose el análisis armónico al promedio de los datos de Tbs y Hr del aire ambiente de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 1994, datos tomados cada 1 hora, se calcularon los siguientes modelos:

$$\begin{aligned}
 T_{bs}(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^5 (a_i \cos\varphi_i + b_i \sin\varphi_i) \\
 Hr(t) &= c_0 + \sum_{i=1}^5 (c_i \cos\varphi_i + d_i \sin\varphi_i)
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

donde:

armónico i	a	b	c	d
0	23,73	--	56,31	--
1	-7,350	-4,667	21,824	15,085
2	0,913	0,278	-2,533	1,742
3	1,067	0,211	-3,268	-1,599
4	-0,171	-0,079	0,538	-0,657
5	-0,324	-0,052	0,697	0,389
variancia acumulada	99,89%		99,89%	

Ambos modelos fueron comparados gráficamente con sus respectivos promedios, obtenidos a partir de la estación climatológica ubicada en la Cañalera, la finca experimental de CETARSA I+D, en el término municipal de Talayuela (Cáceres), cuyo promedio anual de la presión atmosférica es el 971 mbar. Esta comparación está representada en la Figura 5.6 .

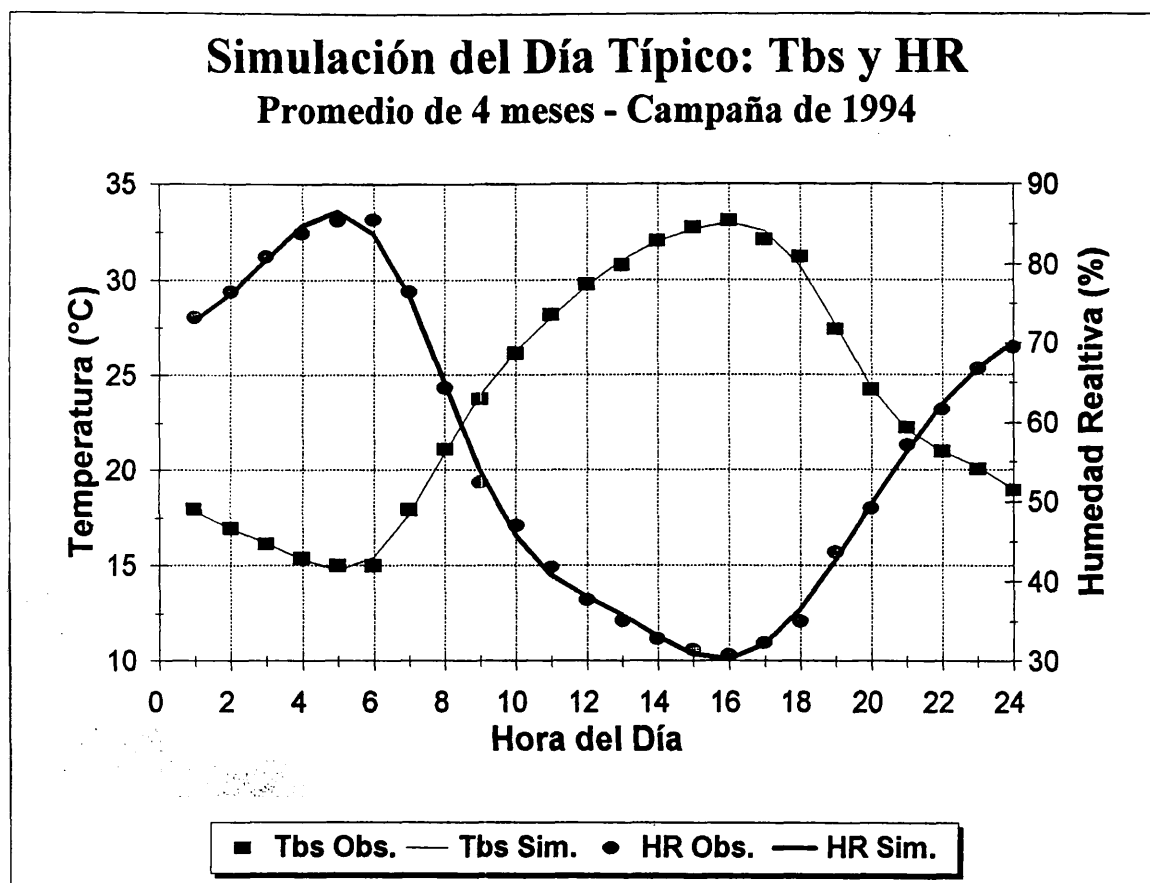


Figura 5.6 - Modelos para estimación de la temperatura y humedad relativa del aire ambiente del Día Típico durante los ensayos realizados en la Campaña del Tabaco de 1994 en el valle del Tiétar.

5.4 Modelo para Calcular T_{bs} y Hr del Aire de Curado

La temperatura del aire de curado (T_{bs3} , °C) en el punto 3 del secadero experimental, según la Figura 4.3, que es el punto donde el aire sale de la masa de tabaco, fue estimada mediante la técnica de regresión múltiple y se obtuvo el siguiente modelo con un R^2 ajustado igual a 0,993:

$$T_{bs3} = 1,01683 + 0,139928.q + 0,00644471.m_t + 0,889756.T - 0,0050319.t \quad (5.4)$$

donde:

T : temperatura de bulbo seco del aire de curado en el plenum del secadero experimental, °C.

La matriz de correlaciones entre las variables del modelo propuesto para T_{bs3} aparece en la Tabla 5.9.

La comparación entre los datos calculados por el modelo propuesto de T_{bs3} y los datos obtenidos experimentalmente está descrita en la Figura 5.7.

Tabla 5.9 - Matriz de correlaciones, según el Método de Pearson, entre las variables del modelo de estimación de la temperatura del aire de curado después de pasar por la masa de tabaco en el secadero experimental.

	T_{bs3}	t	T	m_t	q
T_{bs3}	1,00000	0,91111	0,99494	-0,88186	0,79332
t		1,00000	0,91809	-0,93541	0,73134
T			1,00000	-0,88439	0,76217
m_t				1,00000	-0,76636
q					1,00000

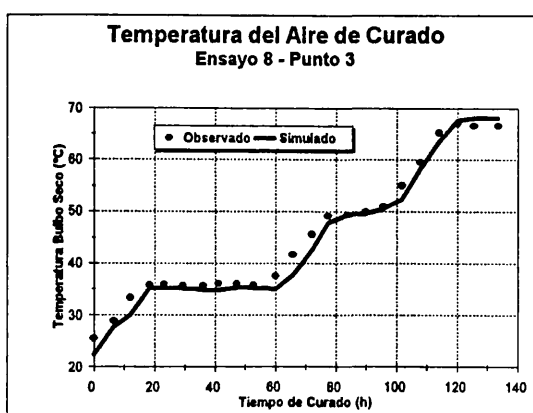
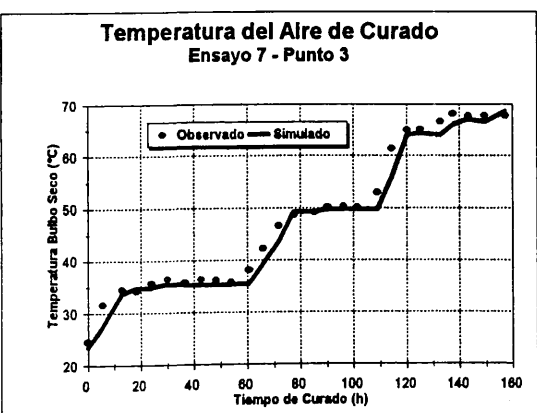
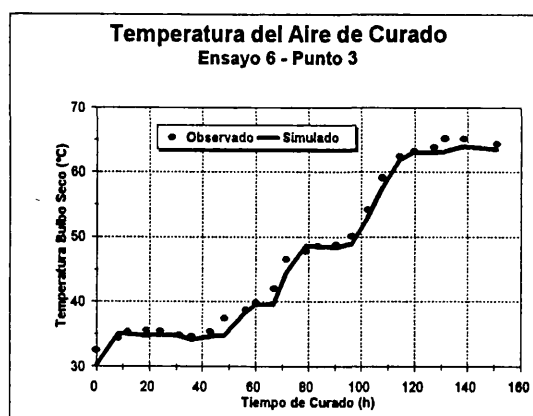
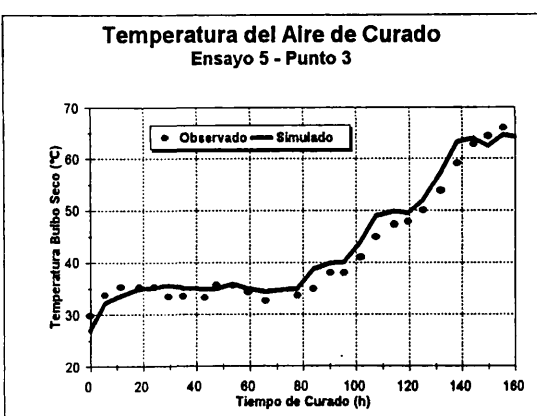
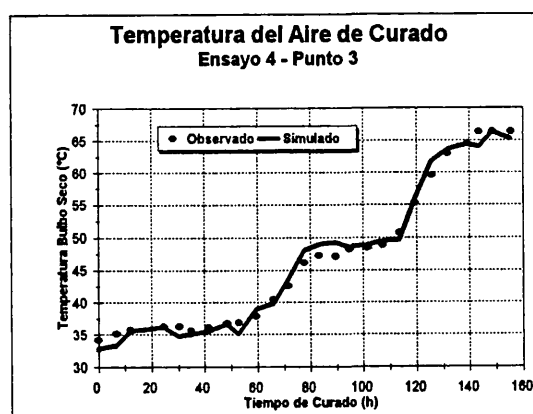
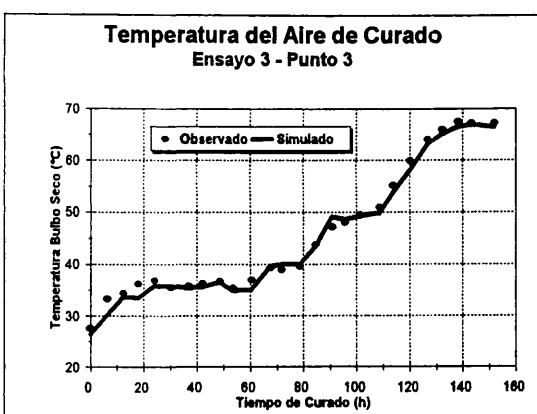
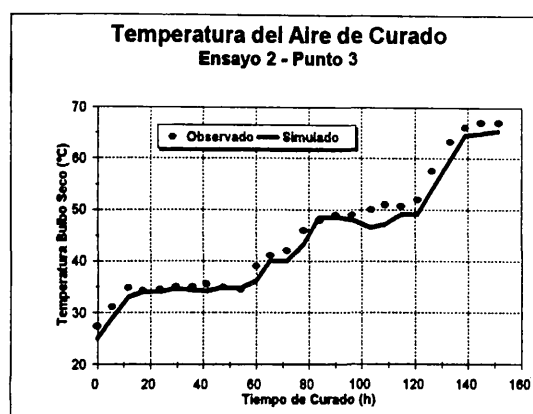
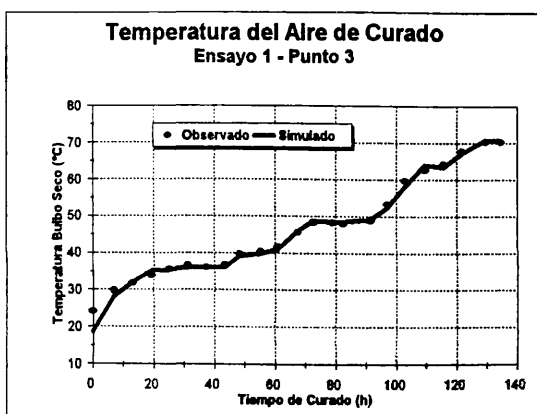


Figura 5.7 - Temperatura del aire de curado saliendo de la masa de tabaco.

La humedad relativa del aire de curado (Hr_3 , °C) en el punto 3 del secadero experimental, según la Figura 4.3, que es el punto donde el aire sale de la masa de tabaco, fue estimada mediante la técnica de regresión lineal múltiple y se obtuvo el siguiente modelo con un R^2 ajustado igual a 0,970:

$$Hr_3 = 24,7008 - 0,345696.q + 0,0706088.m_t + 0,889756.Hr_2 - 0,0806873.t \quad (5.5)$$

en que:

Hr_2 : humedad relativa del aire de curado en el plenum del secadero experimental, °C.

La matriz de correlaciones entre las variables del modelo propuesto para Hr_3 está en la Tabla 5.10 .

La comparación entre los datos calculados por el modelo propuesto de Hr_3 y los datos obtenidos experimentalmente aparece en la Figura 5.8 .

Tabla 5.10 - Matriz de correlaciones, según el Método de Pearson, entre las variables del modelo de estimación de la humedad relativa del aire de curado después de pasar por la masa de tabaco en el secadero experimental.

	Hr_3	t	T	m_t	q
Hr_3	1,00000	-0,95943	0,98112	0,93474	-0,75271
t		1,00000	-0,96362	-0,93541	0,73134
T			1,00000	0,92988	0,71472
m_t				1,00000	-0,76636
q					1,00000

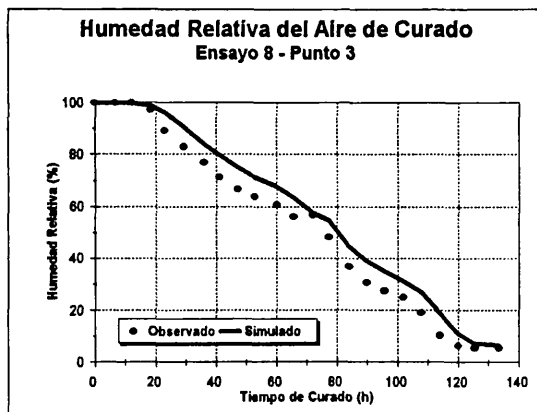
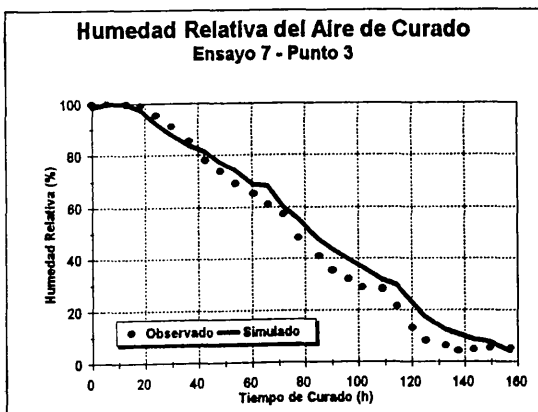
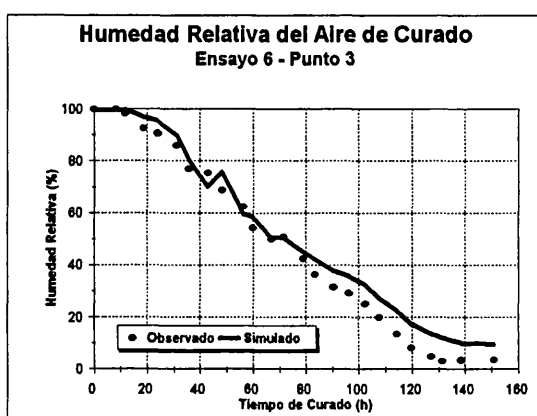
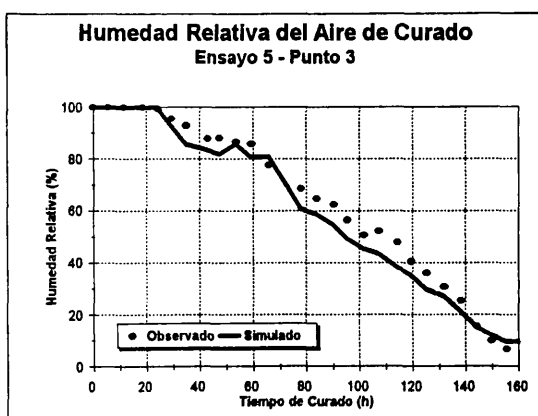
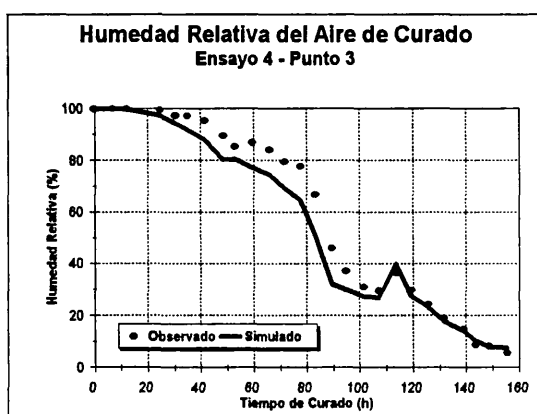
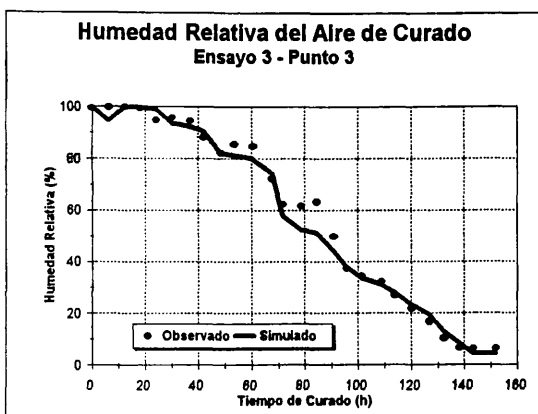
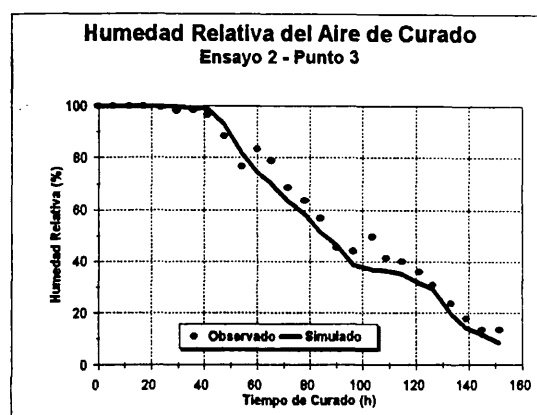
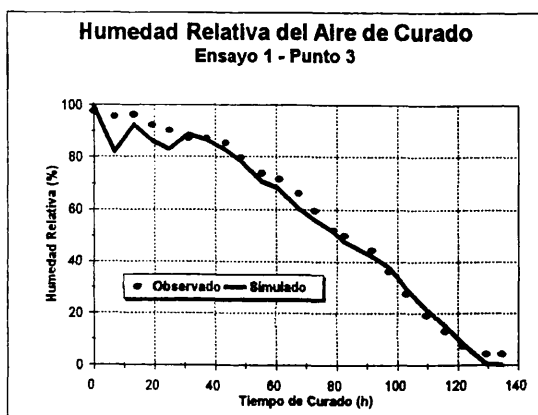


Figura 5.8 - Humedad relativa del aire de curado saliendo de la masa de tabaco.

5.5 Modelo para el Cálculo del Consumo de Combustible.

Si se conoce, a lo largo del proceso de curado, la pérdida de humedad del tabaco (Ecuación 5.1), las condiciones del aire de curado al salir de la masa de tabaco (T_{bs} y H_r , Ecuaciones 5.4 y 5.5), y las condiciones del aire ambiente (Ecuación 5.3) se puede aplicar el balance energético propuesto por Cundiff *et al* (1981) descrito por la Ecuación 3.1 .

El término Q_T del balance energético del proceso de curado en el secadero experimental se calculó por la siguiente ecuación (Cundiff *et al*, 1981):

$$Q_T = \sum_{i=1}^n [(x_i \cdot c_{pa} + m_{si} \cdot c_{pt}) \cdot \theta_i - (x_{i-1} \cdot c_{pa} + m_{si-1} \cdot c_{pt}) \cdot \theta_{i-1}] \quad (5.6)$$

en que:

x : contenido de humedad del tabaco en el instante i y $i-1$, kg;

m_s : materia seca del tabaco en el instante i y $i-1$, kg;

c_{pa} : entalpía específica del aire a presión constante, $4,186 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

c_{pt} : entalpía específica del tabaco a presión constante, $1,456 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

θ : temperatura del tabaco en el instante i y $i-1$, $^{\circ}\text{C}$;

n : tiempo total del proceso de curado, h.

La temperatura del tabaco, según Yang (1983), es el promedio entre la temperatura del aire de curado antes y después de atravesar la masa del producto.

Los términos Q_E y Q_R fueron estimados a partir de la Tabla 3.1, es decir, Q fue considerado como igual al 47,61% de la suma Q_T+Q_A , y Q_R , igual al 12,15% de la suma $Q_T+Q_A+Q_E$. Sustituyendo estos valores en la Ecuación 1, y explicitando Q , se logró la subsiguiente ecuación:

$$Q_C = 1,2968 \cdot (Q_T + Q_A) \quad (5.7)$$

Al final de la simulación del proceso de curado en el secadero experimental, se puede estimar el consumo de combustible por la ecuación:

$$m_{GP} = \frac{Q_C}{PCS \cdot \eta} \quad (5.8)$$

en que:

m_{GP} : consumo de combustible, kg;

PCS: poder calorífico superior del propano, 50.012 kJ.kg⁻¹;

η : eficiencia del quemador del sistema de combustión, 0,90.

Aplicando dicho modelo a las condiciones medias de los ensayos (masa inicial de tabaco: 125,4 kg con humedad inicial: 87,54% bh), bajo el programa de curado de CETARSA I+D, se evaluó el consumo de combustible en función de los promedios de caudal de aire de curado de cada ensayo. Estos datos están referidos en la Figura 5.9. Se usó el 85% de recirculación de aire en la cámara de curado para las dos últimas fases del proceso, como cita Glover (1989).

Si el secadero experimental estuviera trabajando con el caudal de aire de curado recomendado por Suggs *et al* (1985), $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ de tabaco fresco, el consumo de gas propano sería el $0,703 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de tabaco curado. Se estimó este valor mediante la tendencia de la curva calculada por regresión lineal de los datos de la Figura 5.10. El valor este, calculado por estimación, ya estaría más cercano al valor citado por Suggs *et al* (1992), que es el $0,62 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de tabaco curado.

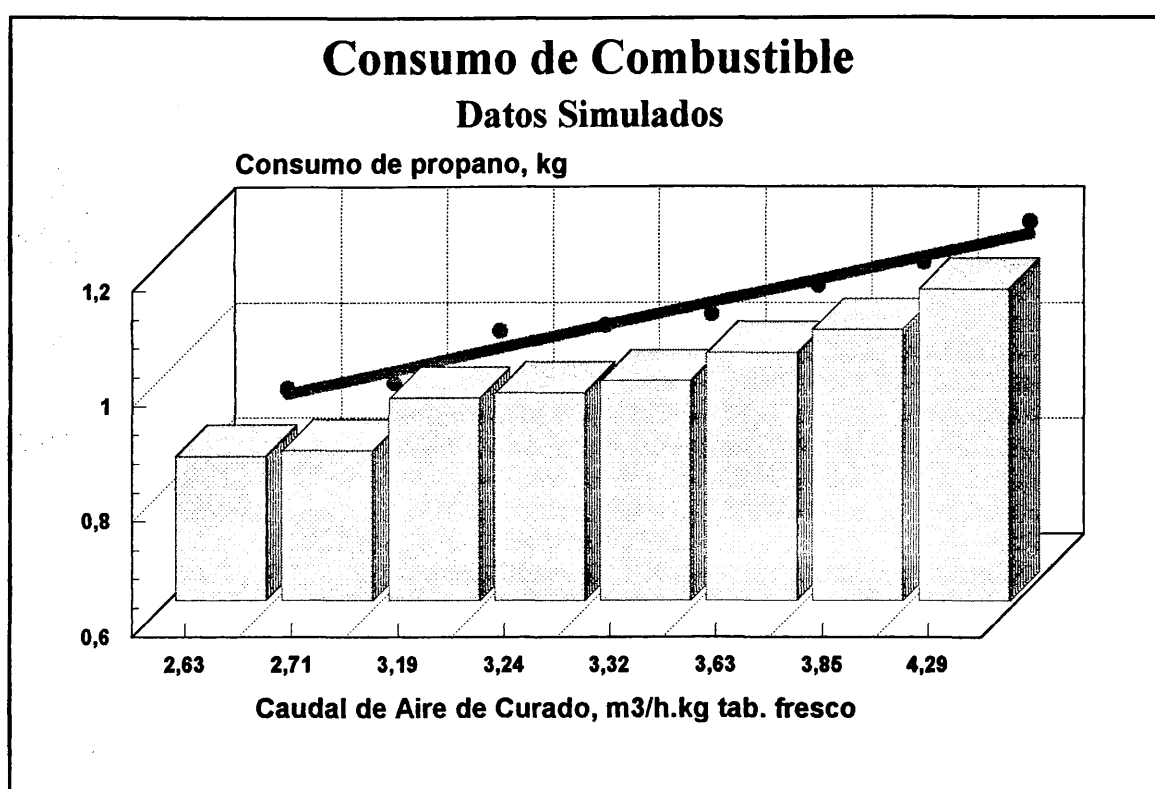


Figura 5.9 - Simulación del consumo de combustible del secadero experimental en función del caudal de aire de curado para una masa de tabaco de $125,4 \text{ kg}$ con contenido de humedad inicial del $87,54\%$.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones de temperatura y humedad relativa del valle del Tiétar y de las condiciones de control, bajo las cuales se desarrollaron los ensayos con el secadero experimental, durante la Campaña del Tabaco de 1994, se puede concluir que:

1. El secadero experimental opera con los mismos niveles de caudal de aire de curado (2,63 al $4,29 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ tabaco fresco) con los cuales operan los secaderos comerciales de la región (3,70 al $4,80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ tabaco fresco). Pero son valores que están por encima del caudal recomendado por Suggs *et al* (1985) para obtener un curado óptimo, que es el $1,80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ tabaco fresco.
2. El secadero estudiado presentó problemas para mantener la humedad relativa del aire de curado por encima del 90% durante el amarilleo. Pero lo mantuvo por encima del 80%.
3. El control de la temperatura de bulbo seco del aire de curado se mantuvo de acuerdo con el programa de curado recomendado por CETARSA I+D.
4. La calidad media del tabaco sacado del secadero experimental no presentó diferencias significativas respecto al tabaco obtenido a partir del secadero del cultivador en la misma finca.

5. Por los puntos anteriores, se puede utilizar el secadero experimental en investigaciones acerca del ahorro energético en el proceso de curado de tabaco Virginia y extrapolar los resultados obtenidos a los secaderos de tamaño y capacidad utilizados en las fincas de la región.
6. El modelo matemático propuesto para cálculo de la masa de tabaco se mostró adecuado para predecir la variable a lo largo del proceso de curado con un R^2 ajustado igual a 0,976.
7. El modelo matemático propuesto para cálculo de la temperatura y humedad relativa del aire de curado, después de pasar por la masa de tabaco, se mostró apropiado para pronosticar las dos variables a lo largo del proceso con un R^2 ajustado igual a 0,993 y 0,970, respectivamente.
8. El consumo medio de combustible ($2,1 \text{ kg.kg}^{-1}$ de tabaco curado) del secadero experimental fue más grande que el valor tomado como referencia por Suggs *et al* (1992), el $0,61 \text{ kg.kg}^{-1}$ de tabaco curado. Esto tiene como causas: **a.** el problema para mantener alta la humedad relativa durante el amarilleo, y **b.** caudal medio del aire de curado por encima del valor recomendado para obtener un curado óptimo, el $1,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ tabaco fresco, según Suggs *et al* (1985). Por ello, se puede suponer que los secaderos de la región del valle del Tiétar, que utilizan caudales superiores áquel recomendado, estarán consumiendo más energía para obtener la misma cantidad de producto.

7. BIBLIOGRAFÍA

Boyette, M.D. 1993. Mechanization. *Flue-cured tobacco - Information 1993*. North Carolina Cooperative Extension Service, p:145-149.

Bridges, T.C.; L.R. Walton; I.J. Ross. 1981. A deep-layer drying model for burley tobacco curing. *TRANSACTIONS of the ASAE* 24(6): 1608-1612.

Bunn, J.M.; W.H. Henson; L.R. Walton. 1972a. Development of an equation to predict damage to burley tobacco from an adverse curing environment. *TRANSACTIONS of the ASAE* 15(3):471-473.

Bunn, J.M.; W.H. Henson; L.R. Walton. 1972b. Predicting damage to burley tobacco from an adverse curing environment. *TRANSACTIONS of the ASAE* 15(3):474-475.

Campbell, J.S., 1994. Tobacco and Environment: the continuous reduction of worldwide energy source use for green leaf curing. *Bulletin of CORESTA Congress*. Zimbabwe. October 12.

Chang, C S.; W.H. Johnson. 1972. High temperature convective drying of tobacco during curing II. Effect of air temperature and velocity on heat and mass transfer coefficients. *Tobacco Science* 14:61-64.

- Chang, C.S.; W.H. Johnson. 1975. Packing density distribution of cut-strip tobacco in curing modules. *Tobacco Science* 22:19-23.
- Christenbury, G.D. 1992. Mechanization and curing. *South Carolina Tobacco Growers Guide* 1993. Cooperative Extension Service, Clemson University, Publication EC 569, November 1992, p:48-51.
- Compañía Española de Tabaco en Rama. 1992. *Interpretación de análisis químicos y características de fumado*. Dirección de Compras de CETARSA, Talayuela, España, 6p.
- Comunidad Europea. 1995. *Production de tabac brut sur 4 ans par groupe de variétés*. Base de datos de la Federación Nacional de Cultivadores de Tabaco.
- Corrêa, P.C.; E.C.Melo; M.C. Michelena. 1993. Modelos matemáticos de secado en capas delgadas para café. *Actas de la Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*, 25ª. Zaragoza. p:287-296.
- Crump, J.C. 1982. The modeling of water sorption in tobacco and celulose. *TRANSACTIONS of the ASAE* :250-256.
- Cundiff, J.S.; J.W. Dodd. 1981. Energy model for forced air tobacco curing. *TRANSACTIONS of the ASAE* 24(1):211-215.

Cundiff, J. S. 1983. Exchanged air control for maximum solar energy utilization in tobacco curing. *TRANSACTIONS of the ASAE* 26(1):260-264.

De la Plaza, S. 1988. Ahorro energético en los procesos de secado de productos agrícolas mediante la bomba de calor. *Actas de la Conferencia Internacional de Mecanización Agraria*. Zaragoza.

De la Plaza, S.; E.C. Melo; I. Blanco. 1993. Propuestas para la optimización del proceso de curado del tabaco Virginia E. en el valle del río Tiétar. *Actas de la Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, 25ª*. Zaragoza. p:345-350

FAO. 1990. *Tabaco: proyecciones de la oferta y el comercio hasta los años 1995 y 2000*. Roma, Estudio FAO Desarrollo Económico y Social nº 86, 82 p.

Federación Nacional de los Cultivadores de Tabaco. 1994. *Informe de la Dirección sobre la situación del sector tabaquero en el Mundo, en la Unión Europea y en España*. XVII Asamblea General Ordinaria. Pamplona. 9/12/94.

Francis, W. 1969. *Los combustibles y su tecnología*. Ediciones Urmo, Bilbao. 688 p.

Gil, C.; C.R. Prada. 1995. La industria del tabaco, atrapada por la salud y el fisco. *El País, Negocios*, (480):1-2, 08/01/95.

Glover, J.W. 1989. *Controlling the bulk tobacco barn*. Publication AG 409, Agricultural Extension Service North Carolina State.

Hawks Jr., S.N. 1986. *Información a los cultivadores de tabaco que curan su cosecha de tabaco Flue-Cured con secaderos BULKTOBAC*. Circular N°2. AGROINDUSTRIA 3S, S.A.Talayuela.

Hawks Jr., S.N.; W.K. Collins. 1986a. Origen e historia del tabaco. *Tabaco Flue-Cured: Principios básicos de su cultivo y curado*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. p:17-26.

Hawks Jr., S.N.; W.K. Collins. 1986b. Características del tabaco flue-cured. *Tabaco Flue-Cured: Principios básicos de su cultivo y curado*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. p:47-57.

Hawks Jr., S.N.; W.K. Collins. 1986c. Recolección y curado. *Tabaco Flue-Cured: Principios básicos de su cultivo y curado*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. p:279-307

ISO 6488, International Standard. 1981. *Tobacco-Determination of water content (reference method)*.

Jaraíz, E. 1992. Y los frailes no dejaron de fumar. *Revista Tiempo*. Especial Tabaco: V Centenario del Tabaco. 16/11/92. p: 113.

Johnson, W.H.; F.H. Hassler. 1963. Carbon dioxide liberation and carbohydrate accumulation during the yellowing phase of tobacco curing. *Tobacco Science* (7): 88-92.

Kerekes, B.; A. Lengyel; L. Fenyvesi. 1993a. Measurement of thermal parameters of tobacco leaves. *Bulletin of CORESTA Congress*, Budapest.

Kerekes, B.; A. Lengyel, L; Fenyvesi. 1993b. Thermal modelling of tobacco leaf. *Bulletin of CORESTA Congress*, Budapest.

Kiranoudis, C.T.; Z.B. Maroulis; D. Marinos-Kouris. 1990. *Drying Techonology* 8(2):351-356.

Lambert, W.R.; J.E.Bennett; J.G. Alphin. 1982. *State model of a tobacco curing system*. ASAE Paper N° 82-3065.

Llanos, M. 1981. *El Tabaco: Manual técnico para el cultivo y el curado*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 305 p.

Locklair, E.E.; L.G. Veasey; M. Samfield. 1957. Equilibrium desorption of water vapor on tobacco. *Agricultural of Food Chemistry* 5(4):294-298.

Maw, B.W.; J.S. Cundiff, P.E. Summer. 1985. Solids loss during tobacco curing. *Tobacco Science* (20):3-5.

Melo, E.C.; P.C. Corrêa. 1993. GRAPSI: "Software" para el cálculo de las propiedades termodinámicas del aire húmedo. *Actas de la Conferencia Internacional de Mecanización Agraria, 25ª*. Zaragoza. p:297-302.

Pérez Carbonell, H. 1987. *El curado del tabaco Flue-Cured*. Colección Agricultura Práctica, Núm. 40, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 103 p.

Reid, W.S.; E.K. Walker. 1975. Air flow and static pressure in deep beds of chopped tobacco leaves. *Tobacco Science* 19: 20-21.

Ryan, I.A.; G.Y. Abawi. 1988. A tobacco curing energy model. *Conference on Agricultural Engineering*. Hawkesbury Agricultural College, 25-29 September.

Sierra Instruments, Inc. 1990. *Sierra Series 660 AVS: air velocity systems*. Monterey, Canada.

Suggs, C.W.; A.L. Zimmer; J.W. Gore. 1985. Pressure vs. airflow through fresh tobacco leaves. *TRANSACTIONS of the ASAE* 28(5): 1664-1667.

Suggs, C.W.; L.L. Blalock; H.B. Peel. 1986. Airflow through fresh tobacco leaf particles. *TRANSACTIONS of the ASAE* 29(4): 1156-1161.

Suggs, C.W.; S.M. Leary; H.S. Bland. 1987. Effects of leaf configuration and bulk density on curing characteristics. *Tobacco Science* 31: 16- 19.

Suggs, C.W.; S.C. Mohapatra. 1989. Dry matter and moisture loss of bright leaf tobacco during curing. *Tobacco Science* 33:9-14.

Suggs, C.W.; H.B. Peel; T.R. Seaboch. 1989. Bulk density and drying effect on air flow through flue-cured tobacco leaves. *Tobacco Science* 33:86-90.

Suggs, C.W.; T.R. Seaboch; C.F. Abrams. 1991. Extraction of energy from crop dryers exhaust. *TRANSACTIONS of the ASAE* 7(2):223-229.

Suggs, C.W.; B.M. Lineberger. 1992. Moisture loss schedule and fuel consumption in bright leaf tobacco curing. *Bulletin of CORESTA Congress*, Spain.

Suggs, C.W. 1993. *Revision and improvement of the curing process for flue-cured tobacco*. Conferencia en las Jornadas Técnicas sobre Tabaco, CETARSA, Talayuela.

Tabaco y Noticias (3):15-20, Junio/Julio 1994.

Tabaco y Noticias (7): 19, Marzo/Abril 1995.

Vianello, R. L.; G.C. Sedyama. 1983. *Programa em FORTRAN para Análise Harmônica*. Brasil, Universidade Federal de Viçosa (Comunicación Personal).

Yang, C.C.; W.H. Johnson. 1982. *Simulation analysis of a multi-barn solar curing system for tobacco*. ASAE Paper N° 82-3561.

Yang, C.C. 1983. *Simulation of a multi-barn solar curing system for tobacco*. PhD Tesis. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina University, Raleigh. 313 p.

Yang, C.C.; W.H. Johnson. 1983. *Design simulation of a multi-barn solar curing system for tobacco*. ASAE Paper N° 83-3536.

Yang, C.C.; W.H. Johnson. 1984. *Indirect heat recycling for a multi-barn tobacco curing system*. ASAE Paper N° 84-3057.

ANEXOS

ANEXO 1

Listado del Modelo de Simulación de Curado de Tabaco Virginia

Program Simulacion_Curado_SecaderoExperimental_V_11; { fichero SISETA11.PAS }

Uses

winCRT, winDOS;

Const

Patm = 101.325; PcsPropano = 50012; {kJ/kg}

Type

Vector1 = array[0..160] of real;
Vector2 = array[1..5] of real;
Vector3 = array[1..5] of integer;
Matriz = array[1..8,1..5] of Real;

Var

i, j, k, cont, Nh, Nhs: integer;

Dir, NomArq, ArchE_dos, ArchS_Dos, ArchP_Dos, opcion: string;

ArchivoE, ArchivoS, ArchivoP: text;

TbsTXT, TbhTXT, hrTXT: string[2];

PraTXT: string[3];

hrAmb, tbsAmb: vector1;
TbsC, TbhC, HrC, HaC, entC: vector1;
TbsS, TbhS, HrS, HaS, entS: vector1;
Mti, MAent, Pra, tm, CaudalEsp: vector1;
Prog: Matriz;
MatSeca, AguaEvap, AguaTab, Ttab: vector1;

pvAmb, pvsAmb, hAmb, veAmb: real;
hasat, hash, hass, haAmb: real;
Caudal, CaudalRec: real;
MasaAire, MasaRec, Mts, MasaIniTab, DeltaMasa, HumIni: real;

tbs1, tbh1, hr1, ha1, hash1, h1, pv1, pvs1, pvsh1, ve1: real;
tbs2, tbh2, hr2, ha2, hash2, h2, pv2, pvs2, pvsh2, ve2: real;
ham, hm: real;

Mtf, RelMfMi, Ecomb, Ccomb, CaudalEspIni: Real;

Qsec, Qtab, Qa, Qe, Qev, Qmtc, Qsc: vector1;
Esec, Etab, Ea, Er, Eev, Emtc, Esc: real;

aux1, aux2: real;

FUNCTION Pot(base,exponente:real):real;

BEGIN

Pot:=Exp(exponente*Ln(base));

END;

```

{ ***** PSICROMETRIA ***** }
FUNCTION PresionVaporSaturado(TABS:REAL):REAL;
CONST
  A=-7511.52;
  B= 89.63121;    C= 0.02399897;
  D= -1.1654551E-5 ; E= -1.2810336E-8;
  F= 2.0998405E-11; G=-12.150799;
VAR
  Aux:REAL;
BEGIN
  tabs:=tabs+273.16;
  if tabs > 273.16
  then Begin
    Aux:=A/TABS+B+C*TABS;
    Aux:=Aux+D*POT(TABS,2)+E*POT(TABS,3);
    Aux:=Aux+F*pot(TABS,4)+G*LN(TABS);
    PresionVaporSaturado:=exp(Aux);
  end
  else Begin
    aux:= 24.2779 - 6238.64/tabs - 0.344438*ln(tabs);
    PresionVaporSaturado:=exp(aux);
  End;
END;

FUNCTION HumedadAbsoluta1 (Pvap:real):real;
Begin
  HumedadAbsoluta1:=0.62198*Pvap/(Patm-Pvap);
End;

FUNCTION HumedadAbsoluta2 (tss, thh, WSS:REAL):REAL;
Const
  a=2501; b=-2.411; c=-1.006; d=1.775; e=4.186;
Var
  aux1, aux2: real;
Begin
  aux1:=(a+b*thh)*wss+c*(tss-thh);
  aux2:= a+d*tss+e*thh;
  HumedadAbsoluta2:=aux1/aux2;
End;

FUNCTION HumedadRelativa (P, PS: real):real;
Begin
  HumedadRelativa := P / PS ;
End;

FUNCTION PresionVapor (W: real):real;
Begin
  PresionVapor:=Patm*W/(0.62198+W);
End;

FUNCTION Entalpia (t, w: real): real;
Begin
  Entalpia:= 1.006 * t + w * ( 2501 + 1.775 * t );
End;

```

```

FUNCTION VolumenEspecifico (tk, w: real): real;
Const
  R = 0.28705;
Var
  P: real;
Begin
  tk:=tk+273.16;
  VolumenEspecifico:= R * tk / Patm * ( 1 + 1.6078 * w);
End;

FUNCTION TemperaturaHumeda ( t, ental: real): real;
var
  th, delta, HumAbs, PvSat, HumRel: Real;
Begin
  delta:=0.1;
  th:=t-delta;
  repeat
    HumAbs:=(ental-1.006*th)/(2501+1.775*th);
    PvSat:=PresionVaporSaturado(th);
    HumRel:=(Patm*HumAbs)/(PvSat*(0.62198+HumAbs));
    if HumRel > 1 then Begin
      th:=th+delta;
      delta:=delta/2;
    End;
    if HumRel < 0.999 then th:=th-delta;
  until (HumRel >= 0.999) and (HumRel < 1);
  TemperaturaHumeda:=th;
End;

FUNCTION TemperaturaSeca (h, w: real): real;
Begin
  TemperaturaSeca := ( h - 2501 * w ) / ( 1.006 + 1.775 * w );
End;

PROCEDURE ValidarTBH (tbs: real; var tbh, hr, ha, ent: real);
Var
  pv, pvs, dd, dif1, dif2, tbhI: Real;
Begin
  dif1:= tbs-tbh;
  pvs:= PresionVaporSaturado (tbs);
  pv:= hr * pvs;
  ha:= HumedadAbsoluta1 (pv);
  ent:= Entalpia(tbs, ha);
  tbhI:= TemperaturaHumeda (tbs, ent);
  if dif1 <= 4.0
  then begin
    dd:= 0.10; { incremento de 10% de HR}
    hr:= hr+dd;
    pvs:= PresionVaporSaturado (tbs);
    pv:= hr * pvs;
    ha:= HumedadAbsoluta1 (pv);
    ent:= Entalpia(tbs, ha);
    tbhI:= TemperaturaHumeda (tbs, ent);
  end
  else begin

```

```

dd:= 0.01; { incremento de 1% de HR}
repeat
    hr:= hr+dd;
    pvs:= PresionVaporSaturado (tbs);
    pv:= hr * pvs;
    ha:= HumedadAbsoluta1 (pv);
    ent:= Entalpia(tbs, ha);
    tbhI:= TemperaturaHumeda (tbs, ent);
    dif2:= tbh-tbhI;
until dif2 <= 0.3;
end;
tbh:=tbhI;
End;
{***** FIN ****}

```

```

PROCEDURE WriteXY (xcol,ylin: integer; texto: string);
Begin
    gotoxy (xcol, ylin);
    write (texto);
End;

```

```

PROCEDURE PantallaFin;
Begin
    ClrScr;
    writexy (38,20, ' F I N ');
    writexy (60,24, ' ¡Hasta la próxima!');
End;

```

```

PROCEDURE PausaTela;
var FixaTela: Char;
Begin
    writeXY (50,24,'<ENTER> para continuar...');
    FixaTela:=ReadKey;
End;

```

```

PROCEDURE NomDOS (VAR Arq: string);
Begin
    Delete(Arq,0,1);
    Arq:=Arq+CHR(0);
End;

```

```

PROCEDURE LeerString ( VAR palavra: String);
var
    Tecla : char;
    Valido : boolean;
    X,Y : Integer;
Begin
    Palavra:="";
    X:=WHEREX;
    Y:=WHEREY;
    repeat
        Tecla:=ReadKey;
        Valido := (Tecla IN [#13,#32..#126]);
        if NOT Valido then
            begin
                Gotoxy(X,Y);
                CLREOL;
            end;
    until Valido;
    Palavra:=Palavra+Tecla;
end;

```

```

        Palavra:="";
    end;
    if (Tecla < #13) and Valido then
    begin
        write(Tecla);
        Palavra:=Palavra+Tecla;
    end;
    until Tecla = #13;
End;
```

PROCEDURE ResultadosPantalla;

```

Begin
    ClrScr;
    writexy(10, 3, 'Tiempo de Curado, h.....');
    writexy(10, 5, '% Humedad inicial del tabaco, bh.....');
    writexy(10, 7, 'Masa inicial de tabaco, kg.....');
    writexy(10, 8, 'Masa final de tabaco, kg.....');
    writexy(10, 9, 'Masa final/Masa inicial, %.....');
    writexy(10, 11, 'Caudal de Aire, m3/h-kg tab. fresco...');
    writexy(10, 12, 'Caudal de Aire, m3/h.....');
    writexy(10, 14, 'Consumo total de propano, kg.....');
    writexy(10, 15, 'Consumo propano, kg/kg tab. curado....');
    writexy(10, 17, 'Qc, MJ.....');
    writexy(10, 18, 'Qr, MJ.....');
    writexy(10, 20, 'Qt, MJ.....');
    writexy(10, 21, 'Qa, MJ.....');
    writexy(10, 22, 'Qe, MJ.....');
    writexy(10, 23, 'Qmtc, MJ.....');
    gotoxy(60, 3); write (Nhs :10);
    gotoxy(60, 5); write (HumIni :10:2);
    gotoxy(60, 7); write (MasaIniTab:10:2);
    gotoxy(60, 8); write (Mtf :10:2);
    gotoxy(60, 9); write (RelMfMi :10:2);
    gotoxy(60, 11); write (CaudalEspIni:10:2);
    gotoxy(60, 12); write (CaudalEspIni*MasaIniTab:10:2);
    gotoxy(60, 14); write (Ccomb:10:2);
    gotoxy(60, 15); write (Ccomb/Mtf:10:2);
    gotoxy(40, 17); write (Ecomb/1000:10:2);
    gotoxy(40, 18); write ( Er/1000:10:2);
    gotoxy(40, 20); write ( Etab/1000:10:2);
    gotoxy(40, 21); write ( Ea/1000:10:2);
    gotoxy(40, 22); write ( Esec/1000:10:2);
    gotoxy(40, 23); write ( Emtc/1000:10:2);
    PausaTela;
End;
```

PROCEDURE Grabar (Cadena: string);

```

Begin
    write(ArchivoS, cadena);
End;
```

PROCEDURE ResultadosFichero;

```

Var
    x: string;
Begin
    writeln(ArchivoS); writeln(ArchivoS);
    write (ArchivoS, 'Tiempo de Curado, h.....');
```

```

writeln(ArchivoS,Nhs:10);
        writeln(archivoS);
write (ArchivoS,'Masa inicial de tabaco, kg.....');
writeln(ArchivoS,MasaIniTab :10:2);
write (ArchivoS,'Masa final de tabaco, kg.....');
writeln(ArchivoS,Mtf :10:2);
write (ArchivoS,'Masa final/Masa inicial, %.....');
writeln(ArchivoS,RelMfMi :10:2);
        writeln(archivoS);
write (ArchivoS,'Consumo total de propano, kg.....');
writeln(ArchivoS,Ccomb:10:2);
write (ArchivoS,'Consumo propano, kg/kg tab. curado....');
writeln(ArchivoS,Ccomb/Mtf:10:2);
        writeln(archivoS);
write (ArchivoS,'Caudal de Aire, m3/h.....');
writeln(ArchivoS,CaudalEspIni*MasaIniTab:10:2);
write (ArchivoS,'Caudal de Aire, m3/h-kg tab. fresco...');
writeln(ArchivoS,CaudalEspIni:10:2);
        writeln(archivoS);
write (ArchivoS,'Energía Combustible, MJ...');
writeln(ArchivoS, Ecomb/1000:10:2);
write (ArchivoS,'Energía Respiración, MJ...');
writeln(ArchivoS, Er/1000:10:2);
        writeln(ArchivoS);
write (ArchivoS,'Energía Tabaco, MJ.....');
writeln(ArchivoS, Etab/1000:10:2);
write (ArchivoS,'Energía Aire, MJ.....');
writeln(ArchivoS, Ea/1000:10:2);
write (ArchivoS,'Energía Cámara, MJ.....');
writeln(ArchivoS, Esec/1000:10:2);
        writeln(archivoS);
write (ArchivoS,'Energía min teórica, MJ...');
writeln(ArchivoS, Emtc/1000:10:2);
writeln(ArchivoS); writeln (ArchivoS);
Write (ArchivoS,' Tiempo');
write (ArchivoS,' TbsAmb HrAmb CaudEsp');
write (archivoS,' TbsC HrC TbhC entC haC');
write (ArchivoS,' TbsS HrS TbhS entS haS');
write (ArchivoS,' MasTab TempTab AguaEvap MatSeca AguaTab');
write (ArchivoS,' Qtab Qa Qmtc Qev');
writeln(ArchivoS);
For i:=0 to Nhs do
begin
    STR( i:10,x); grabar(x);
    STR( TbsAmb[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR( HrAmb[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(CaudalEsp[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(TbsC[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(HrC[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(TbhC[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(entC[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR( haC[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(TbsS[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(HrS[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(TbhS[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(entS[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR( haS[i]:10:2,x); grabar(x);

```

```

    STR( Mti[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(Ttab[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(AguaEvap[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR( MatSeca[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR( AguaTab[i]:10:2,x); grabar(x);
    STR(Qtab[i]/1000:10:2,x); grabar(x);
    STR( Qa[i]/1000:10:2,x); grabar(x);
    STR(Qmtc[i]/1000:10:2,x); grabar(x);
    STR( Qev[i]/1000:10:2,x); grabar(x);
    writeLn (ArchivoS);
end;
Close (ArchivoS);
End;

```

PROCEDURE ZerarVectores;

Var i: integer;

begin

For i:=0 to 160 do

begin

TbsAmb[i] :=0;

HrAmb[i] :=0;

TbsC[i]:=0; TbhC[i] :=0; HrC[i] :=0;

HaC[i]:=0; entC[i] :=0;

TbsS[i]:=0; TbhS[i] :=0; HrS[i] :=0;

HaS[i]:=0; entS[i] :=0;

Pra[i]:=0; Mti[i] :=0; MaEnt[i] :=0; tm[i] :=0;

CaudalEsp[i]:=0; AguaEvap[i]:=0; AguaTab[i]:=0; MatSeca[i]:=0;

Qa[i]:=0; Qsec[i]:=0; Qsc[i]:=0; Qtab[i]:=0; Qev[i]:=0; Qmtc[i]:=0;

end;

end;

PROCEDURE Crear_Fichero_Salida;

Const

Ext2 = '.TXT';

Var

x: string;

Begin

ClrScr;

writexy(10,8,'Informe la unidad y el directorio de trabajo: ');

gotoxy(60,8); Leerstring(Dir);

writexy(10,15,'Nombre del archivo de salida: ');

gotoxy (60,15);LeerString(NomArq);

ArchS_dos:=Dir+NomArq+Ext2;

NomDos(ArchS_dos);

Assign (ArchivoS, ArchS_dos);

Rewrite (ArchivoS);

End;

PROCEDURE Leer_Programa_Curado;

Const

Ext2='.TXT';

Var

tbsx, tbhx, hrx: Real;

blanco: string[1];

error: integer;

Begin

ClrScr;


```
writexy(10,5, 'El archivo con el Programa de Curado: Tbs, Tbh, Hr, %RecAire...');
writexy(10,6,'==> ');LeerString(NomArq);
ArchP_dos:=Dir+NomArq+Ext2;
NomDos(ArchP_dos);
Assign (ArchivoP, ArchP_dos);
Reset (ArchivoP);
ClrScr;
For i:=1 to Nhs do
begin
  Read (ArchivoP,
    TbsTXT, blanco, TbhTXT, blanco, hrTXT, blanco, PraTXT);
  ReadLn(ArchivoP);
  Val(TbsTXT,TbsC[i],error);
  Val(TbhTXT,TbhC[i],error);
  Val( hrTXT, HrC[i],error);
  Val(PraTXT, Pra[i],error);
end;
TbsC[0]:=TbsC[1]; TbhC[0]:=TbhC[1];
End;
```

PROCEDURE LeerDatos;

Begin

```
  ClrScr;
  Writexy(10,10,'Masa inicial del tabaco (kg)..... '); read (MasaIniTab);
  MasaIniTab:=125.4;
  writexy(10,12,'Tiempo de Curado (h)..... '); read (Nh);
  writexy(10,14,'Tiempo de Simulaci³n (h)..... '); read (Nhs);
  writexy(10,16,'m3 aire/h-kg tab. fresco..... '); Read (CaudalEspIni);
  writexy(10,18,'Humedad Inicial del Tabaco (% bh).. '); read (HumIni);
  Caudal := CaudalEspIni*MasaIniTab;
  CaudalEsp[0]:=CaudalEspIni;
  HumIni:=HumIni/100;
  MatSeca[0]:= MasaIniTab * (1-HumIni);
  Leer_Programa_Curado;
  Crear_Fichero_Salida;
End;
```

FUNCTION Tbs_Amb (tiempo: integer): Real;

{ tiempo: tiempo de curado (h),
 Variancia explicada por 20 armonicos = 98.87 % }

Type

vector = array[1..20] of real;

Const

```
  NumArm = 20;    {n° de armonicos}
  periodo = 152;
  media = 21.45;
  CoefCos: vector = ( 0.11,-0.04, 0.06, 0.00,-0.33, 1.16,-0.44,-0.11,-0.12,-0.06,
    0.02,-0.01, 0.18, 0.04, 0.06, 0.07, 0.03, 0.05, 0.16,-0.02);
  CoefSen: vector = (-0.03, 0.29,-0.17,-0.30,-0.08, -1.20, 1.07, 0.29, 0.25, 0.23,
    0.20, 0.12,-0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.02, 0.06, 0.08);
```

Var

```
  ia: integer;
  suma, SumaCos, SumaSen, ang: real;
```

Begin

```
  Suma:=0; SumaSen:=0; SumaCos:=0;
```

```

For ia:=1 to NumArm do
  begin
    ang :=ia*2*pi*(Tiempo-1)/Periodo;
    SumaCos:=SumaCos+CoefCos[ia]*cos(ang);
    SumaSen:=SumaSen+CoefSen[ia]*sin(ang);
    Suma :=SumaCos+SumaSen;
  end;
Tbs_Amb:=Media+Suma;
End;

```

```

FUNCTION Hr_Amb (tiempo: integer): Real;
{ tiempo: tiempo de curado (h),
  Variancia explicada por 5 armonicos = 99.89 % }

```

```

Type
  vector = array[1..5] of real;
Const
  NumArm = 5;      {n|| de armonicos}
  periodo = 24;
  media = 56.31 ;
  CoefCos: vector = (21.82,-2.53,-3.27, 0.54, 0.70);
  CoefSen: vector = (15.08, 1.74,-1.60,-0.66, 0.39);
Var
  ia: integer;
  suma, SumaCos, SumaSen, ang: real;
Begin
  Suma:=0; SumaSen:=0; SumaCos:=0;
  For ia:=1 to NumArm do
    begin
      ang :=ia*2*pi*(Tiempo-1)/Periodo;
      SumaCos:=SumaCos+CoefCos[ia]*cos(ang);
      SumaSen:=SumaSen+CoefSen[ia]*sin(ang);
      Suma :=SumaCos+SumaSen;
    end;
  Hr_Amb:=Media+Suma;
End;

```

```

PROCEDURE ClimaAmbiente;
Begin
  ClrScr;
  writexy(10,10,'Generando la variación de Tbs y Hr del Ambiente...');
  For i:=1 to 152 do
    TbsAmb[i]:=Tbs_Amb(i);
  For i:=1 to 24 do
    begin
      HrAmb[i]:=Hr_Amb(i);
      For j:=1 to 7 do HrAmb[i+24*j]:=HrAmb[i];
    end;
  End;

```

```

{ ***** Ecuaciones del punto 2 obtenidas por regresión ***** }
FUNCTION Masa_Tabaco (tbs, hr, q: real; tiempo: integer): Real;
{ mi: masa inicial tabaco, kg
  tbs: temperatura aire en el plenum, C
  hr: humedad relativa aire en el plenum, %
  q: caudal especifico, m3/h.kg tabaco humedo
  tiempo: tiempo de curado (h)
      R2 ajustado: 0.976}
Const
  A= 0.649994; B= 0.451631; C=0.444297;
  D=-0.244901e-1; E=-0.571223; F=0.635402;
Var
  aux, mi: real;
Begin
  mi :=MasalniTab;
  aux := A + B*q + C*hr + D*tbs + E*tiempo + F*mi;
  Masa_tabaco:=aux;
End;

FUNCTION Tbs_Sup (mt, ts, qe: real; tiempo: integer): Real;
{  mt: masa del tabaco en el instante t (kg)
  ts: tbs aire de curado - punto 1 (C)
  q: caudal especifico de aire de curado - punto 1
      (m3/h-kg tab. fresco)
  tiempo: tiempo de curado (h)
      R2 ajustado: 0.992}
Const
  A= 0.101683e+1; B= 0.139928; C=0.644471e-2;
  D=0.889756; E=-0.503190e-2;
Begin
  Tbs_Sup:=A + B*qe + C*mt + D*ts + E*tiempo;
End;

FUNCTION Hr_Sup (mt, hr, qe: real; tiempo: integer): Real;
{  mt: masa del tabaco en el instante t (kg)
  hr: hr aire de curado - punto 1 (C)
  q: caudal especifico de aire de curado - punto 1
      (m3/h-kg tab. fresco)
  tiempo: tiempo de curado (h)
      R2 ajustado: 0.9698}
Const
  A=0.247008e+2; B=-0.345696; C=0.706088e-1;
  D=0.836847; E=-0.806873e-1;
Var
  Aux: Real;
Begin
  Aux:=A + B*qe + C*mt + D*hr + E*tiempo;
  if Aux > 100 then Hr_Sup:=100 else Hr_Sup:=Aux;
End;
{ ***** FIN ***** }

```

PROCEDURE SimularProceso;

Begin

ClrScr;

writexy(10,10,' Tiempo de simulaci3n (h): ');

writexy(10,15,'Masa (kg): ');

{**** Valores Iniciales ****}

{Ttab[0]:=TbsAmb[0];} Ttab[0]:=30;

Mti[0] := MasaIniTab;

AguaTab[0]:=MasaIniTab*HumIni;

{*****}

{++}For j:=1 to Nhs do

begin

CaudalRec := Caudal * Pra[j]/100; { caudal que recirculará }

Mti[j]:=Masa_Tabaco(TbsC[j], HrC[j], CaudalEsp[j-1], j);

if Mti[j] <= 0 then Mti[j]:=Mti[j-1]; {corrección de la ecuación }

DeltaMasa:=Mti[j-1]-Mti[j];

if j<=48 then begin

AguaEvap[j]:=DeltaMasa*0.87;

MatSeca[j]:=MatSeca[j-1] - DeltaMasa*0.13;

end

else begin

AguaEvap[j]:=DeltaMasa;

MatSeca[j]:=MatSeca[j-1];

end;

AguaTab[j]:=Mti[j]-MatSeca[j];

CaudalEsp[j] := Caudal/Mti[j];

{*** Punto 1 - antes de pasar por el tabaco ***}

tbs1:=TbsC[j];

hr1 := HrC[j];

hr1:=hr1/100;

if hr1=1 then hr1:=0.99999;

pvs1:= PresionVaporSaturado (Tbs1);

pv1:= hr1 * pvs1;

ha1:= HumedadAbsoluta1 (pv1);

h1:= Entalpia(tbs1,ha1);

ve1:= VolumenEspecifico(tbs1,ha1);

tbh1:= TemperaturaHumeda (tbs1,h1);

MasaAire:=Caudal/ve1;

{***** fin punto 1 *****}

{*** Punto 2 - después de pasar por el tabaco ***}

tbs2:= Tbs_Sup(Mti[j], TbsC[j], CaudalEsp[j], j);

hr2 := Hr_Sup(Mti[j], HrC[j], CaudalEsp[j], j);

hr2:=hr2/100;

if hr2=1 then hr2:=0.99999;

pvs2:= PresionVaporSaturado (Tbs2);

pv2 := hr2 * pvs2;

ha2 := HumedadAbsoluta1 (pv2);

h2 := Entalpia(tbs2,ha2);

ve2 := VolumenEspecifico(tbs2,ha2);

tbh2:= TemperaturaHumeda (tbs2,h2);

if tbh2 < tbh1 then begin

tbh2:=tbh1;

h2:=h1;

end;

{***** fin punto 2 *****}

```

{***** Aire Ambiente *****)
pvsAmb := PresionVaporSaturado(TbsAmb[j]);
pvAmb := HrAmb[j]/100 * PvsAmb;
haAmb := HumedadAbsoluta1(pvAmb);
hAmb := Entalpia(TbsAmb[j],haAmb);
veAmb := VolumenEspecifico (TbsAmb[j], haAmb);
{*****}
{**** verificando si entra aire en el secadero*****}
Pra[j]:=Pra[j]/100;
if Pra[j] = 1
then begin
    MaEnt[j]:=0.0; {no entra aire en el secadero}
    tm[j]:=tbs2;
    ham := ha2;
    hm := h2;
end
else begin
    MaEnt[j]:= ( Caudal - CaudalRec ) / veAmb;
    MasaRec := CaudalRec / ve2;
    tm[j] :=(MasaRec*tbs2 + MaEnt[j]*TbsAmb[j])/MasaAire;
    ham :=(MasaRec* ha2 + MaEnt[j]*haAmb )/MasaAire;
    hm :=(MasaRec* h2 + MaEnt[j]* hAmb )/MasaAire;
end;
{*****}
{*** Los resultados en los vectores ***}
TbhC[j]:=tbh1;
entC[j]:=h1;
HaC[j]:=ha1*1000; { g/kg }
TbsS[j]:=tbs2;
TbhS[j]:=tbh2;
entS[j]:=h2;
HrS[j]:=hr2*100; { % }
HaS[j]:=ha2*1000; { g/kg }
{*****}
RelMfMi := Mti[Nhs]/MasaIniTab;
{***** Balances de Energia *****)
{*Qtab: energia para aumentar y mantener la temperatura del tabaco}
Ttab[j]:=(tbs1+tbs2)/2;
aux1:=(AguaTab[j] *4.186 + MatSeca[j] *1.456)*Ttab[j];
aux2:=(AguaTab[j-1]*4.186 + MatSeca[j-1]*1.456)*Ttab[j-1];
Qtab[j]:= abs(aux1 - aux2);
{*****}
{*Qmtc: energia minima teorica del curado }
Qev[j]:= (2501 + 1.775 * Ttab[j]) * AguaEvap[j];
Qmtc[j]:= Qtab[j] + Qev[j];
{*****}
{*Qa: energia para aumentar y mantener temperatura aire de curado}
aux1 := 1.006*tbs1 + ha1*(2501+1.775*tbs1);
aux2 := 1.006*tm[j-1] + haM*(2501+1.775*tm[j-1]);
Qa[j] := MasaAire * ( aux1 - aux2 );
{*****}
{*****}
gotoxy (50,10); write(j);
gotoxy (50,15); write (Mti[j]:10:4);
{++}end;{ fin FOR}
{*****}

```

```

{**** calculando salida ****}
Mtf := Mti[Nhs];
RelMfMi := Mtf/MasaIniTab * 100;
{ calculando las energias al final proceso }
Ea:=0; Etab:=0; Esec:=0; Emte:=0; Eev:=0;
For k:=i to Nhs do
begin
    Ea := Ea+Qa[k];
    Eev := Eev+Qev[k];
    Etab := Etab+Qtab[k];
    Emte := Emte+Qmte[k];
end;
Er := (Etab+Ea+Esec) * 0.1215;
Esec := (Etab+Ea) * 0.4761;
Ecomb := 1.2968 * (Etab+Ea);
Ccomb := Ecomb / ( PcsPropano * 0.90 );
{ ****}
End;

BEGIN { inicio del programa}
    ClrScr;
    Repeat
        ZerarVectores;
        LeerDatos;
        ClimaAmbiente;
        SimularProceso;
        ResultadosPantalla;
        ResultadosFichero;
        ClrScr; writexy (20,20,'(c)ontinuar o (f)inalizar ==> ');
        gotoxy (50,20); LeerString (opcion);
    Until opcion = 'f';
    PantallaFin;
END.

```